



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Calibração Radiométrica de Instrumentação
Óptica Espectrofotométrica**

Francisco Miguel Mota Rabaça Madeira

Orientação: Prof. Doutor Daniele Bortoli

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Área de especialização: *Energia Solar*

Dissertação

Évora, 2016



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**Calibração Radiométrica de Instrumentação
Óptica Espectrofotométrica**

Francisco Miguel Mota Rabaça Madeira

Orientação: Prof. Doutor Daniele Bortoli

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Área de especialização: *Energia Solar*

Dissertação

Évora, 2016

Agradecimentos

Nesta página vou, de certo modo, retribuir o que de bom me foi dado ao longo destes vários meses de luta, sacrifícios e essencialmente de aquisição de conhecimentos, aprendizagens e também de grande esforço pessoal.

Em primeiro lugar queria agradecer ao Professor Doutor Daniele Bortoli, meu orientador de dissertação, pela oportunidade que me deu em poder realizar a minha dissertação sob a sua orientação e com o seu protótipo SPATRAM, mas também por toda a sua dedicação, disponibilidade e por todos os ensinamentos que me transmitiu para o meu enriquecimento.

Não me poderei esquecer daqueles colegas e amigos que, directa ou indirectamente, foram inextinguíveis ao ajudarem-me a ultrapassar vários obstáculos e barreiras que foram surgindo, bem como na conquista de vários objectivos propostos, quer com palavras de incentivo, com ideias ou simplesmente com a amizade. Há que destacar sem dúvida o Pedro e a Sandra!

Obrigado também à minha namorada que desde a primeira hora sempre me ajudou em tudo o que conseguiu, sendo enorme todo o seu apoio.

Como os últimos são sempre os primeiros, quero deixar o meu grande obrigado aos meus pais, à minha irmã e à minha avó que foram inesgotáveis no seu apoio e paciência, não só durante este período, bem como em todo o meu trajecto quer académico, quer pessoal.

Resumo

Os espectrómetros instalados a bordo de satélites e à superfície da Terra têm desempenhado um papel fundamental na compreensão da química e dinâmica da atmosfera e na monitorização da poluição ambiental. O SPATRAM (*S*Pectrometer for *A*tmospheric *T*Racers *M*easurements) é um espectrómetro ultravioleta – Visível que compreende a região espectral entre 250-950nm e se encontra instalado no Instituto de Ciências da Terra (ICT) desde Abril de 2004. Enquanto isso, em 2012, um novo modelo do instrumento SPATRAM foi desenvolvido no ICT e foi chamado SPATRAM2.

O objectivo do trabalho proposto é a calibração radiométrica do espectrómetro SPATRAM2, utilizando uma lâmpada de halogéneo e uma esfera de integração. A calibração radiométrica do sistema SPATRAM2 permitirá obter a radiação solar directa, com alta resolução espectral, o que actualmente não se encontra disponível.

Este tipo de medição poderá ter um papel importante na investigação e desenvolvimento na área da energia solar e aplicações.

Palavras-chave: calibração, espectrofotómetro, radiação solar , radiância, sensor CCD.

Radiometric Calibration of Spectrophotometric Optical Instrumentation

Abstract

Spectrometers installed aboard satellites and located on Earth's surface have played a fundamental role to understand atmosphere's chemistry and dynamic and to monitor environmental pollution. The SPATRAM (SPectrometer for Atmospheric TRAcers Measurements) instrument is an ultraviolet spectrometer – visible that covers spectral region between 250-950nm and it is installed in *Instituto de Ciências da Terra* (Institute of Earth Sciences), ICT, since April 2004. Meanwhile, in 2012, a new model of SPATRAM instrument was developed in ICT and was called SPATRAM2.

The goal of this project is the radiometric calibration of the SPATRAM2 spectrometer using a halogen lamp and an integrating sphere. Radiometric calibration of SPATRAM2 system will provide direct solar radiation, with high spectral resolution, that is not available nowadays.

This type of measurement may play an important role in solar energy's progress and investigation.

Key-words: calibration, spectrophotometer, solar radiation, radiance, CCD sensor.

Índice

Resumo	IV
Abstract	V
Lista de Acrónimos.....	XII
Grandezas radiométricas e fotométricas	XIII
1. Introdução e Objectivos	1
1.1. Estrutura da tese	2
2. Atmosfera.....	3
2.1. Composição da atmosfera.....	3
2.2. Camadas da Atmosfera	5
2.3. Pressão atmosférica.....	6
2.4. Poluição atmosférica	6
2.5. Consequências da Poluição Atmosférica.....	10
2.6. Radiação Solar.....	11
2.6.1. Espectro solar	11
2.6.2. Balanço energético	13
2.7. Radiação Solar em Portugal.....	14
2.8. Distribuição da Radiação Solar na Superfície Terrestre	15
2.9. Lei de <i>Wien</i>	16
2.10. A radiação terrestre	17
2.11. Variação da quantidade de energia	18

2.11.1. Latitude	18
2.11.2. Período do ano	18
2.11.3. Duração dos dias	19
3. Tipos de Medições	20
3.1. Medições <i>in situ</i>	20
3.2. Detecção remota	20
3.3. Fundamentos da Espectrometria.....	22
4. Calibração Radiométrica	22
5. Configuração Instrumental	23
5.1. SPATRAM/SPATRAM2.....	23
5.2. <i>Data Acquisition System</i> (DAS)	25
5.3. Fibra Óptica.....	27
5.4. <i>VErtical LLooking Device</i> - VELOD.....	29
5.5. Esfera de Integração OL Series 455.....	30
5.6. Lâmpada OL Series 220.....	32
5.7. Controlador OL 400-C	32
6. Procedimento Experimental.....	33
7. Análise dos dados, resultados e discussões	37
8. Conclusões	49
9. Referências	50

Índice de Figuras

Figura 1 - Camadas da atmosfera [4]	5
Figura 2 - Espectro Solar [16]	12
Figura 3 - Espectro Solar de absorção na banda de comprimentos de onda da luz visível [17].	12
Figura 4 - Perdas de radiação [19].....	14
Figura 5 - Ângulo Zenital	15
Figura 6 - Variação do ângulo zenital em diferentes latitudes; a linha vermelha representa o zénite do local	16
Figura 7 - Exemplo da variação da radiação solar	16
Figura 8 - Relação entre a potência e o comprimento de onda.....	17
Figura 9 - Interferência da latitude na variação da quantidade de energia [21]	18
Figura 10 - Interferência da órbita da Terra na variação da quantidade de energia [21].....	19
Figura 11 - Interferência da duração dos dias na variação da quantidade de energia [21].....	19
Figura 12 - Tipos de medições <i>in situ</i> [22].....	20
Figura 13 - Ilustração do circuito: 1-SPATRAM2; 2-DAS Interface; 3-Fibra Óptica; 4-VELOD; 5-Esfera de Integração; 6-Lâmpada; 7-Controlador;.....	23
Figura 14 - SPATRAM [29]	24
Figura 15 - SPATRAM2.....	25
Figura 16 - DAS GUI realizando medições.....	25
Figura 17 - Conjunto SPATRAM2 - Interface	26
Figura 18 - Composição de uma fibra óptica [39]	27

Figura 19 - Propagação de um raio de luz dentro de uma fibra óptica [37]	28
Figura 20 - VELOD em laboratório.....	30
Figura 21 - Esfera Integradora no laboratório.....	31
Figura 22 - Esquema da Esfera Integradora [32].....	31
Figura 23 - Lâmpada de halógeno OL Series 220 [31]	32
Figura 24 - Controlador OL 400-C [34]	33
Figura 25 - Lâmpada no interior da caixa, esfera de integração e VELOD	34
Figura 26 - Pormenor da ventoinha e respectiva fonte de alimentação	34
Figura 27 - Pormenor do controlador	34
Figura 28 - Ficheiro .PRG utilizado	35
Figura 29 - Potência da lâmpada entre 250 e 1100nm, com barra de erros de 2%.....	36
Figura 30 - SPATRAM instalado no contentor no observatório do ICT-UE	36
Figura 31 - VELOD recebendo a radiação solar	37
Figura 32 - Cabeçalho do ficheiro ASCII para medir através da interface líquida do SPATRAM.	38
Figura 33 - Cabeçalho do ficheiro ASCII para medir através da interface de quartzo do SPATRAM.....	39
Figura 34 - Folha de cálculo Excel com os valores das contagens digitais o respectivo Tempo de Exposição.....	39
Figura 35 - Primeira medição (VELOD/Fibra Quartzo/Interface Quartzo), em laboratório, no intervalo espectral 301 - 361nm	42
Figura 36 - Segunda medição (VELOD/Fibra Líquida/Interface Quartzo), em laboratório, no intervalo espectral 301 - 361nm	42

Figura 37 - Terceira medição (VELOD/Fibra Líquida/Interface Líquida), em laboratório, no intervalo espectral 301 - 361nm	43
Figura 38 - Primeira medição (VELOD/Fibra Líquida/Interface Quartzo), no exterior, no intervalo espectral 301 - 361nm	44
Figura 39 - Segunda medição, (VELOD/Fibra Quartzo/Interface Quartzo), no exterior, no intervalo espectral 301 - 361nm	45
Figura 40 - Terceira medição, (VELOD/Fibra Líquida/Interface Líquida), no exterior, no intervalo espectral 301 - 361nm.....	45
Figura 41 - Série espectral calibrada para Fibra Líquida/Interface Quartzo	47
Figura 42 - Série espectral calibrada para Fibra Quartzo/Interface Quartzo.....	48

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do uso de fibras ópticas.....	29
Tabela 2 - Intervalos espectrais e respectivo identificativo	38
Tabela 3 - Equação da potência da lâmpada em cada intervalo espectral	40
Tabela 4 - Radiância total da lâmpada em cada posição espectral	40
Tabela 5 - Radiância total e tempo de exposição, primeira medição no exterior	46
Tabela 6 - Radiância total e tempo de exposição, segunda medição no exterior	47
Tabela 7 - Radiância total e tempo de exposição, terceira medição no exterior	48

Lista de Acrónimos

ASCII - American Standard Code for Information Interchange

CCD - Charge Coupled Device

CGE - Centro de Geofísica de Évora

COV - Compostos Orgânicos Voláteis

DAS - Data Acquisition System

DOAS - Differential Optical Absorption Spectroscopy

ECU - Electronic Control Unit

GUI - Graphical User Interface

ICT - Instituto de Ciências da Terra

IQAr - Índice de Qualidade do Ar

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NIST - National Institute of Standards and Technology

OMU - Optical Mechanical Unit

REM - Radiação Electromagnética

SPATRAM - SPectrometer for Atmospheric TRAcers Monitoring

SZA – Solar Zenith Angle

TCC - Temperatura de Cor Correlacionada

TOMS - Total Ozone Mapping Spectrometer

UV - Ultra Violeta

VELOD - VErtical LOoking Device

Grandezas radiométricas e fotométricas

Estas grandezas são aquelas usadas na medição da radiação óptica e da luz. As principais são:

Energia radiante - energia total emitida por uma fonte (J);

Densidade de energia radiante - energia radiante por unidade de volume (J/m^3);

Potência radiante – taxa de emissão ou transmissão da radiação, ou seja, é a energia radiante por unidade de tempo (J/s ou Watt);

Intensidade luminosa (I) – fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido numa determinada direcção (cd - *candela*);

Luminância (L) – relação entre a intensidade luminosa e a área da fonte (cd/m^2);

Radiância - potência irradiada por unidade de área para os comprimentos de onda em determinado intervalo ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$);

Irradiância - quantidade de fluxo radiante recebida por uma unidade de área numa superfície, tendo em consideração todas as direcções possíveis (W/m^2);

Reflectância – razão entre a radiação electromagnética incidente numa superfície e o fluxo que é reflectido; frequentemente é apresentada sob a forma de percentagem e seria 100% para um reflector ideal [1] - [3].

O Sol, fonte de vida

“A energia solar constitui a verdadeira causa de todos os processos físicos e químicos que ocorrem na Terra, responsáveis pelas condições meteorológicas, pelas circulações oceânicas, pela modelação da crosta terrestre e por todos os fenómenos biológicos.

Todos os componentes do sistema climático, designadamente a atmosfera, a hidrosfera, a litosfera e a biosfera, devem a sua origem e as suas características à radiação solar. Por isso, podemos dizer que a radiação solar é o factor essencial do ambiente.”

Adaptado de J. Pinto Peixoto, A Radiação Solar e o Ambiente, 1981.

1. Introdução e Objectivos

Nos últimos 40 anos, o ozono estratosférico, nas latitudes médias do Hemisfério Norte, sofreu uma redução significativa. A análise dos resultados obtidos a partir do instrumento TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) instalado a bordo do satélite Nimbus7, evidencia a redução significativa da coluna total de O_3 mesmo antes da erupção do vulcão Pinatubo em 1991.

Durante os anos oitenta, estudos das séries temporais de perfis de O_3 no Hemisfério Norte mostram que a média anual de concentração tem aumentado na troposfera e diminuído na baixa estratosfera. Outros autores confirmaram estes resultados, chamando a atenção para o facto de que a tendência de diminuição de O_3 , por década, é maior no Sul da Europa do que a encontrada nos Estados Unidos, considerando áreas às mesmas latitudes e com valores semelhantes de óxidos de azoto à superfície.

Os espectrómetros instalados a bordo de satélites e à superfície da Terra têm desempenhado um papel fundamental na compreensão da química e dinâmica da atmosfera e na monitorização da poluição ambiental, através de medições de radiação solar ultravioleta e visível. A partir destas observações, séries temporais de dados de longo prazo têm sido construídas em muitas regiões do planeta, a fim de se estudarem variações temporais de gases traçadores na atmosfera, quantidades de aerossóis estratosféricos e outros parâmetros físicos importantes. No entanto o potencial destes sistemas é grande para a utilização noutras áreas, nomeadamente da Energia Solar, uma vez que medem a radiação solar directa com média/alta resolução espectral.

O instrumento SPATRAM é um espectrómetro ultravioleta-visível que compreende a região espectral entre 250 e 950nm, com uma resolução espectral média de 0,5nm. O SPATRAM encontra-se instalado no Observatório de Física da Atmosfera do Instituto de Ciências da Terra (ICT) (antigo Centro Geofísico de Évora - CGE) na Universidade de Évora, desde Abril de 2004, e faz medidas de radiação solar para obter colunas totais e perfis verticais de gases como o ozono, o dióxido de azoto, enxofre e bromo.

O sistema SPATRAM permite o auto alinhamento óptico (calibração em frequências), graças a uma lâmpada espectral de mercúrio instalada no corpo principal do instrumento. Actualmente, o sistema funciona em modo diferencial, o que significa que os resultados obtidos correspondem a diferenças de espessura óptica entre duas

observações obtidas para diferentes valores de elevações solares. Com o objectivo de trabalhar com valores absolutos de radiação solar difusa ou directa, a calibração radiométrica do SPATRAM é um passo obrigatório a fim de alcançar a rigorosa precisão requerida nas medições. Assim, pretende-se obter os coeficientes de calibração que têm de ser aplicados às medições obtidas, a fim de se atingir a calibração radiométrica do instrumento, executando-se a conversão da contagem digital instrumental para quantidades físicas reais. O SPATRAM é o primeiro de uma série de instrumentos semelhantes que foram desenvolvidos no ICT. Neste trabalho é utilizado o novo instrumento SPATRAM2, que possui basicamente as mesmas componentes óptica e electrónica do SPATRAM. Assim, o objectivo deste trabalho não é só a calibração de um só instrumento, mas a implementação de uma metodologia que possa ser aplicada em geral para calibração de outra instrumentação semelhante.

A metodologia a seguir para a calibração espectral prevê a utilização de uma lâmpada de halogéneo Oriel calibrada e de uma esfera de integração, uma vez que a lâmpada de halogéneo usada internamente pelos instrumentos SPATRAM2 não é suficiente para a calibração radiométrica do sistema completo. O laboratório óptico do ICT, equipado com componentes ópticos e componentes mecânicos, foi utilizado a fim de realizar as medições necessárias para determinação dos coeficientes de calibração.

A calibração radiométrica do sistema SPATRAM2 permitirá obter valores de radiação solar directa com alta resolução espectral em $\text{Watt/m}^2.\text{nm}$, o que não se encontra habitualmente disponível. Este tipo de medição poderá ter um papel importante na investigação e desenvolvimento na área da energia solar e aplicações.

1.1. Estrutura da tese

Esta dissertação está agrupada em nove capítulos. O capítulo 1 é a Introdução, onde estão também incluídos os objectivos da dissertação e a sua estrutura. No capítulo 2 encontra-se uma descrição sobre a atmosfera, desde a sua composição até às radiações solar e terrestre. O capítulo 3 diz respeito aos diferentes tipos de medições, nomeadamente as medições *in situ* e a detecção remota. No capítulo 4 é feito uma referência à calibração radiométrica, no qual se foca este trabalho. No capítulo 5 está detalhada a configuração instrumental de todos os instrumentos utilizados. No capítulo 6 é descrito todo o procedimento experimental. No capítulo 7 são apresentados todos os resultados. No capítulo 8 são apresentadas as conclusões

do estudo elaborado. Por fim, no capítulo 9, é feita uma listagem de toda a bibliografia consultada.

2. Atmosfera

A Atmosfera é a camada gasosa e com material particulado que envolve a Terra. É composta por inúmeros gases, retidos devido à gravidade e ao campo magnético, e é essencial para a vida e para qualquer processo físico e biológico, bem como para a protecção da radiação ultravioleta [4], [5], [6].

2.1. Composição da atmosfera

A composição da atmosfera relaciona-se com a disposição dos diferentes gases que a constituem, que são principalmente o nitrogénio e oxigénio. É constituída também por uma mistura de gases com minúsculas partículas de poeira, fumo e água nos estados líquido, sólido e gasoso. O oxigénio (O) (20,95%) e o nitrogénio (N) (78,08%) são os mais importantes, realçando que o vapor de água (H₂O), o árgon (Ar), o dióxido de carbono (CO₂) e o ozono (O₃) têm igualmente bastante importância a nível meteorológico. É possível verificar também outros gases que ocupam somente menos de 0,01% (néon (Ne), hélio (He), hidrogénio (H), metano (CH₄) são alguns exemplos) e chamados de gases raros [7]. Existem ainda outros elementos, embora em quantidades ínfimas, cuja presença não é necessariamente natural e que podem variar de acordo com a localização. É o caso dos pólenes, da poeira, da fumaça, de cinzas vulcânicas e de alguns microrganismos [8].

No início da formação do planeta, a atmosfera era essencialmente formada por gases provenientes de erupções e colisões na superfície da terra primitiva. Os gases abundantes eram: o metano, o vapor de água e o dióxido de carbono. Ao surgirem os primeiros organismos a realizarem fotossíntese, o dióxido de carbono começou a ser absorvido e a formar oxigénio e, deste modo, a atmosfera começou a ficar saturada. Deste modo, hoje em dia o oxigénio e o nitrogénio juntos ocupam cerca de 99% da composição da atmosfera [4].

O nitrogénio é muito importante para os seres vivos, pois participa na formação de diversas moléculas orgânicas necessárias para os seus metabolismos. Algumas bactérias que habitam nas raízes de plantas leguminosas (como feijão, ervilha e

lentilha) absorvem-no. Em troca, elas produzem nitratos e sais hidrogenados, elementos de vital importância para essas plantas que, por sua vez, podem servir de alimentos para vários animais e também para o homem. O oxigénio é o elemento mais importante para a manutenção da vida no planeta, pois intervém na respiração de todos os seres vivos, produzindo energia para o organismo e também é indispensável para a realização de combustões [7], [9]. O ozono resulta da dissociação das moléculas de oxigénio, a partir de determinadas radiações solares e os átomos resultantes recombina-se com o oxigénio molecular. A maior parte forma-se a partir de processos como, por exemplo, a absorção de radiação ultravioleta mas, no entanto, também se forma junto à superfície da Terra, através de descargas eléctricas [10]. O dióxido de carbono surge na atmosfera a partir da respiração dos seres vivos, da actividade vulcânica, da decomposição e da combustão de substâncias que contêm carbono. É importante essencialmente para a realização da fotossíntese, onde é absorvido e, na presença de luz e água, produz glicose e energia. É também um absorvente das radiações infravermelhas, sendo, por isso, um regularizador da temperatura e um dos responsáveis pelo efeito de estufa na Terra, retendo uma parte da radiação reflectida [7], [9], [10]. O vapor de água, cuja quantidade varia consoante a humidade do ar, depende de lugar para lugar. Provém da evaporação das águas de rios, mares e lagos, da respiração dos seres vivos, da transpiração das plantas, da evaporação da água do solo e até da evaporação da água de dejectos (fezes e urina de animais). É responsável pelo desencadeamento de fenómenos físicos afectando outros elementos de clima ou meteorológicos, nomeadamente a temperatura, a pressão atmosférica e a precipitação, originado assim a pluviosidade que ocorre à superfície da Terra e pela regularização térmica, uma vez que absorve radiações infravermelhas [9], [10]. Os gases raros, também chamados de gases nobres, estão praticamente em escassez na atmosfera e têm uma difícil reacção com os outros elementos e substâncias. São utilizados acima de tudo para o funcionamento de equipamentos, como máquinas fotográficas, letreiros luminosos, entre outros [7], [9]. As partículas, ou material particulado, engloba tudo o que seja poeiras, fumos, sais minerais e microrganismos suspensos na atmosfera, devido ao seu pequeno tamanho. Podem ter origem em incêndios, em erosões do solo pelo vento, em cristais de sal marinho dispersos pelas ondas que se quebram, em emissões vulcânicas ou em actividades agrícolas e industriais. São muito importantes, pois interferem na formação de nevoeiros, nuvens e precipitação e absorvem ou reflectem a radiação solar incidente, influenciando a temperatura [5], [6], [10], [11].

2.2. Camadas da Atmosfera

Estudos revelam que o limite superior da atmosfera oscila entre os 800 e os 1000km de altitude e o limite inferior coincide com a superfície terrestre (nível médio das águas do mar). Esta divide-se em várias camadas com diferentes funções e características:

Troposfera: nível do mar até 12km de altura – é onde ocorrem todos os fenómenos meteorológicos e a poluição do ar; composta por nitrogénio, oxigénio e dióxido de carbono; temperatura varia entre -60 a 40°C e diminui com a altitude; as propriedades atmosféricas são facilmente transferidas por turbulência de grande escala e mistura;

Estratosfera: de 12 a 50km de altura – temperatura varia entre -5 a -70°C; é mais quente devido à presença da camada de ozono responsável pela barreira de protecção dos raios ultravioleta;

Mesosfera: de 50 a 80km de altura – temperaturas muito baixas, entre -10 e -100°C; inexistência de gases ou nuvens que absorvam radiação solar;

Termosfera: de 80 a 650km de altura – camada mais extensa; ar é escasso e, por isso, absorve facilmente a radiação solar; temperatura bastante alta, pode atingir os 1000°C;

Exosfera: de 650 a 1000km de altura – camada mais externa da atmosfera; antecede o espaço interplanetário; composta por hélio e hidrogénio; não existe gravidade; encontram-se satélites e telescópios espaciais [4] - [6].

A Figura 1 mostra estas camadas, de um modo mais esquemático:



Figura 1 - Camadas da atmosfera [4]

2.3. Pressão atmosférica

Estamos constantemente sujeitos à pressão exercida pelo peso dos gases atmosféricos. Estes são compostos por átomos e moléculas, deslocam-se a grandes velocidades e coincidem entre si, com a superfície do globo, com os seres humanos e com qualquer objecto que surja no seu caminho. A força que exercem, por unidade dessa superfície, chama-se pressão atmosférica. Assim, pode-se definir "pressão atmosférica" como o peso total do ar por unidade de área, no ponto onde a pressão é medida. Esta pressão varia com a localização e com o momento, porque a quantidade de ar acima da superfície da Terra varia, sendo que a pressão atmosférica média ao nível do mar é de cerca de 1atm, correspondendo a 101,3Kpa [8].

As diferenças de pressão no interior da atmosfera conduzem à deslocação do ar de um local para outro. É deste modo que se geram os ventos e, em última análise, todos os diversos elementos que constituem o estado do tempo. Dado que os gases se deslocam em todos os sentidos, exercem pressão sobre qualquer superfície, independentemente da direcção em que ela esteja orientada. À medida que se sobe na atmosfera há uma menor quantidade de moléculas e átomos acima da superfície considerada e, assim, a pressão atmosférica diminui com a altitude [12].

2.4. Poluição atmosférica

Pode-se definir poluição atmosférica como a introdução antropogénica de substâncias ou energia para o ar, resultando em efeitos prejudiciais para os humanos e seres vivos, bem como nos ecossistemas e pondo em risco os valores estéticos e outras utilizações ambientais.

Esta emissão de poluentes para a atmosfera tem aumentado enormemente nas últimas décadas, não por causa de fenómenos naturais, mas sim devido a actividades humanas como a indústria, os transportes, o aumento da população e a sua concentração em grandes cidades, etc. Assim, os poluentes atmosféricos afectam significativamente a qualidade do ar em zonas urbanas, o que se traduz em impactos ao nível da saúde humana e do ambiente. Deste modo, considera-se poluente qualquer substância presente no ar que, pela sua concentração, possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, causando inconveniente ao bem-estar público, danos aos materiais, à fauna e à flora, ou seja, prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às actividades normais da comunidade [44].

Os poluentes atmosféricos existem sob a forma de gases e de partículas, podendo ser naturais e artificiais, provenientes de fontes fixas (indústrias, centrais termoeléctricas, vulcões) e móveis (todos os meios de transporte motorizados) [8], [11], [13]. Consoante a sua origem, os poluentes podem classificar-se em primários e secundários. Os primários são aqueles que são emitidos directamente pelas fontes emissoras para a atmosfera, como por exemplo, os gases que provêm do tubo de escape de um veículo automóvel ou de uma chaminé de uma fábrica. É o caso dos óxidos de enxofre (SO_x), dos óxidos de azoto (NO_x), do monóxido de carbono (CO) ou das partículas em suspensão. Os secundários são aqueles formados na atmosfera através da reacção química entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera, dos quais o ozono (O_3) é o mais conhecido [11], [13].

Os óxidos de enxofre, em especial o dióxido de enxofre (SO_2), são maioritariamente emitidos por vulcões, produzidos em grande escala por processos industriais e pelo tráfego de veículos a motor. Além das fontes antropogénicas, o SO_2 tem origem natural sobretudo em actividades geotérmicas. O enxofre é um composto abundante no carvão e no petróleo, sendo que a combustão destes emite quantidades consideráveis de SO_2 . Contudo, devido às limitações impostas pelos Comissão Europeia na redução do teor de enxofre nos combustíveis, os níveis de concentração deste poluente têm vindo a baixar. Nos últimos anos as emissões de origem industrial têm vindo também a diminuir em consequência das medidas técnicas e regulamentares que têm sido tomadas. Na atmosfera, o enxofre dissolve-se no vapor de água, formando um ácido que interage com outros gases e partículas aí presentes, originando sulfatos e outros poluentes secundários nocivos. Uma maior oxidação gera a formação de chuvas ácidas e é uma das causas de preocupação sobre o impacto ambiental da utilização destes combustíveis como fontes de energia.

A nível de saúde, causa irritação dos olhos e problemas de ordem respiratória e pode também causar lesões a nível pulmonar. A presença deste poluente pode ainda potenciar os efeitos de doenças cardiovasculares e respiratórias, como por exemplo a asma.

A combinação do azoto e do oxigénio do ar dá origem a compostos de fórmulas químicas diversas, agrupados sob a designação comum de óxidos de azoto (NO_x). Os óxidos de azoto, em especial o dióxido de azoto (NO_2) são emitidos a partir de combustão a altas temperaturas, e do sector rodoviário, sendo que das fontes naturais se destacam as trovoadas e a actividade bacteriana. A maior parte do dióxido de azoto na atmosfera é formado a partir da oxidação do óxido nítrico (NO). Também

desempenha um papel importante na atmosfera com reacções que produzem ozono ao nível do solo ou *smog*. Uma vez que o dióxido de azoto é um poluente relacionados com o tráfego, as emissões são geralmente mais elevadas nas zonas urbanas e menor nas zonas rurais [8]. Os óxidos de azoto podem reagir com outros compostos presentes na atmosfera, como por exemplo alguns hidrocarbonetos (compostos orgânicos voláteis - COV), na presença da radiação solar, originando a formação de outros poluentes [14]. O NO₂ em concentrações elevadas causa efeitos que vão desde a irritação dos olhos e garganta, até afectação da membrana dos órgãos respiratórios, diminuição da capacidade respiratória, dores no peito, edema pulmonar e danos no sistema nervoso central e nos tecidos.

Estes óxidos contribuem igualmente para o fenómeno das chuvas ácidas, para a destruição da camada de ozono e para o efeito de estufa.

O monóxido de carbono (CO) de origem antropogénica provém essencialmente da combustão incompleta de combustíveis fósseis ou de outras matérias orgânicas. Na presença de um suprimento adequado de O₂ mais o monóxido de carbono produzido durante a combustão é imediatamente oxidado a dióxido de carbono (CO₂), verificando-se maioritariamente em meio urbano, onde o tráfego automóvel é a principal fonte. Outras fontes de emissão incluem os processos industriais, a queima residencial de madeira para aquecimento ou os incêndios florestais [8]. O CO de origem secundária presente na atmosfera resulta, sobretudo, da oxidação de poluentes orgânicos, como o metano. Os efeitos deste componente na saúde humana são consequência da sua capacidade de se combinar irreversivelmente com a hemoglobina do sangue em vez do oxigénio. Os primeiros sintomas são as dores de cabeça e as vertigens que se agravam com o aumento das concentrações deste poluente, podendo depois observar-se náuseas e vômitos, e no caso de uma exposição prolongada, pode ocorrer o coma ou a morte [14].

Os COV são produtos químicos orgânicos que facilmente evaporam à temperatura ambiente, como o metano, o benzeno ou o xileno. Contêm o elemento carbono nas suas estruturas moleculares e são de especial preocupação, pois na presença do sol, sofrem reacções fotoquímicas que podem originar ozono ou *smog*. Os COV entram na composição dos combustíveis mas também na de diversos produtos de uso corrente como as tintas, colas, cosméticos, solventes, detergentes de limpeza, de uso doméstico ou industrial. Estes compostos são emitidos durante a sua combustão (nomeadamente nos gases de escape dos

veículos rodoviários), ou por evaporação no momento da sua produção, armazenamento e utilização e podendo também ser emitidos pela vegetação.

As partículas finas formam-se a partir dos poluentes primários e outros compostos da atmosfera, através de reacções químicas ou a partir do choque entre vários compostos atmosféricos, formando partículas de maiores dimensões. Podem-se definir como um conjunto complexo de substâncias, minerais ou orgânicas, que se encontram em suspensão na atmosfera, sob a forma líquida ou sólida, cuja dimensão pode variar entre algumas dezenas de nanómetros e uma centena de micrómetros. Estas partículas são emitidas para a atmosfera a partir de várias fontes antropogénicas, sendo de destacar a queima de combustíveis fósseis, o tráfego rodoviário e determinados processos industriais; das fontes naturais destacam-se os vulcões, os fogos florestais ou a acção do vento sobre o solo e superfícies aquáticas. Contudo, as que representam um risco para a saúde humana estão associadas à fracção aerodinâmica inferior a 10mm (PM10), ou seja, as partículas em suspensão susceptíveis de passar através de um filtro selectivo com 50% de eficiência para um diâmetro aerodinâmico de 10mm. Os efeitos de sujidade nos edifícios e monumentos são os efeitos mais evidentes das partículas no ambiente [8].

O ozono é uma molécula formada por três átomos de oxigénio, muito reactiva e com um forte poder oxidante. Este componente desempenha um papel vital ao filtrar a radiação solar ultravioleta, protegendo assim a vida sobre a Terra mas, por outro lado, quando em proximidade com a superfície terrestre, afecta negativamente a saúde humana. A formação de ozono, ao contrário do que se poderia pensar, é menor nos centros urbanos, ou seja, junto às fontes emissoras dos precursores, e maior fora dos espaços urbanos. Por um lado, porque existem nas zonas urbanas poluentes que reagem quimicamente removendo o ozono, como o monóxido de azoto emitido pelos veículos e que consome o ozono para formar oxigénio e dióxido de azoto (NO_2), ao contrário deste último que potencia a formação de ozono. Por outro lado, a velocidade das reacções fotoquímicas, donde resulta a formação do ozono, é lenta, o que leva a que os efeitos dos poluentes precursores emitidos nas zonas urbanas, não sejam sentidos de imediato, dependendo da velocidade e direcção do vento, atingem muitas vezes as zonas rurais que chegam a registar concentrações de ozono superiores às verificadas nos centros urbanos. As concentrações elevadas deste poluente ocorrem especialmente nos dias de verão: forte radiação solar, temperaturas elevadas, vento fraco e estabilidade atmosférica. Provoca irritações nos olhos, no nariz e na garganta, dores de cabeça e problemas respiratórios, tais como dores no peito e tosse [11].

De entre os diversos poluentes atmosféricos, existem alguns que, por serem mais comuns, especialmente nas áreas urbanas e industriais, são acompanhados de forma mais intensiva, e por isso, permitem determinar o Índice de Qualidade do Ar (IQA), o qual dá informação sobre o estado da qualidade do ar que respiramos [13]. A qualidade do ar é um indicador ambiental que deve ser monitorizado nas localidades onde existam fontes de poluição significativas de modo a salvaguardar o bem-estar das populações e evitar a exposição das mesmas a episódios de poluição, os quais poderão afectar a saúde. Estes poluentes atmosféricos podem ser particularmente nocivos para crianças, idosos, grávidas e indivíduos que sofrem de problemas respiratórios e cardíacos [11].

2.5. Consequências da Poluição Atmosférica

As consequências da exposição aos poluentes atmosféricos dependem essencialmente das suas concentrações na atmosfera e do tempo de exposição podendo, por exemplo, exposições prolongadas a concentrações baixas de poluentes serem mais nocivas do que exposições de curta duração a concentrações elevadas. As que mais se destacam são:

- A degradação dos cursos de água e dos ecossistemas por causa das chuvas ácidas;
- O aparecimento de doenças respiratórias, cardiovasculares, reacções alérgicas e doenças de pele provocadas pelo contacto ou ingestão de alimentos contaminados com poluentes atmosféricos;
- A formação de poluentes secundários como o ozono, fenómeno denominado *smog*, que se traduz em impactos significativos na saúde, principalmente a nível respiratório;
- Os danos no património, com a degradação de materiais de construção pelo ataque químico dos poluentes acidificantes provenientes das chuvas ácidas, escurecimento de fachadas de edifícios, deterioração de tecidos, borrachas e plásticos.

Para além de actuar à escala local, a poluição atmosférica tem também um impacto regional e uma dimensão global. Neste último caso, não importa de onde vêm os poluentes pois o seu efeito na atmosfera é sentido por todo o planeta. É este o

caso do Efeito de Estufa, das alterações climáticas e do Buraco de Ozono, que a par com outros problemas globais resultam da libertação para a atmosfera de determinados gases e partículas em todo o Planeta [13].

A natureza utiliza recursos para se proteger da poluição atmosférica, mas estes são limitados. Assim, cabe a cada um de nós a responsabilidade de ajudar nesse processo, adoptando medidas para evitar ou moderar a poluição de nossa própria cidade, de nosso país e, até, do mundo como um todo. Podemos começar pelo nosso próprio automóvel, abdicando mais dele e andar um pouco mais a pé ou de bicicleta. Agindo assim, além de gastar menos combustível e poluir menos, contribuímos para reduzir os congestionamentos tão frequentes nas nossas cidades e cooperamos também com a nossa própria saúde [11].

Em Portugal foi estabelecido um regime para prevenção e controlo das emissões de poluentes para a atmosfera, fixando os princípios, os objectivos e os instrumentos apropriados à garantia de protecção do recurso natural ar, bem como as medidas, procedimentos e obrigações dos operadores das instalações abrangidas, com vista a evitar ou reduzir a níveis aceitáveis a poluição atmosférica originada nessas mesmas instalações [14].

2.6. Radiação Solar

Pode-se definir radiação solar como a quantidade de energia que o Sol irradia nas mais variadas direcções para o espaço, sendo que apenas uma pequena parte atinge a superfície da Terra, sendo esta pequena quantidade diferente de lugar para lugar. Dependentes da energia solar estão vários processos físicos e químicos como: o ciclo hidrológico, a desigual repartição da temperatura, a diversidade de climas - frio nas regiões polares, quentes e húmidos nas regiões equatoriais. A radiação solar é um fenómeno electromagnético, já que se propaga através de ondas com uma velocidade aproximada de 300000km/s, levando cerca de oito minutos a chegar à Terra [15].

2.6.1. Espectro solar

O Sol apresenta uma temperatura na ordem dos 6000K na sua superfície, o que o leva a emitir uma radiação com pequeno comprimento de onda e elevada frequência. Um conjunto de várias radiações solares forma então o espectro solar (Figura 2):

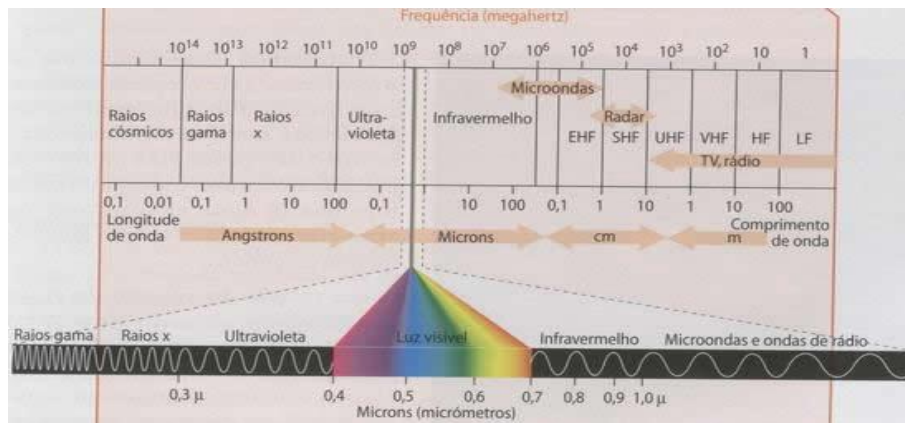


Figura 2 - Espectro Solar [16]

É composto por dois tipos de radiações: as visíveis e as invisíveis. O primeiro tipo diz respeito às cores do arco-íris (comprimento de onda entre 0,4 μ m e 0,78 μ m); o segundo tipo diz respeito às bandas do ultravioleta, dos raios X, dos raios Gama e dos raios Cósmicos (comprimento de onda inferior a 0,4 μ m) e às bandas do infravermelho, das ondas Rádio ou ondas Hertzianas (comprimento de onda superior a 0,78 μ m) [16]. Este espectro fornece várias informações, desde logo quais os elementos químicos presentes no sol e a sua abundância, bem como a temperatura das diferentes camadas da atmosfera onde estes elementos se encontram presentes. A intensidade da linha de um determinado elemento visível no espectro representa a sua abundância, enquanto a presença de linhas dos elementos em determinadas regiões do espectro permite calcular a temperatura.

A Figura 3 mostra o espectro solar na banda da luz visível, à superfície da Terra, e com as linhas de absorção de alguns elementos presentes, como o Hidrogénio (H), Sódio (Na), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Ferro (Fe) [17]:

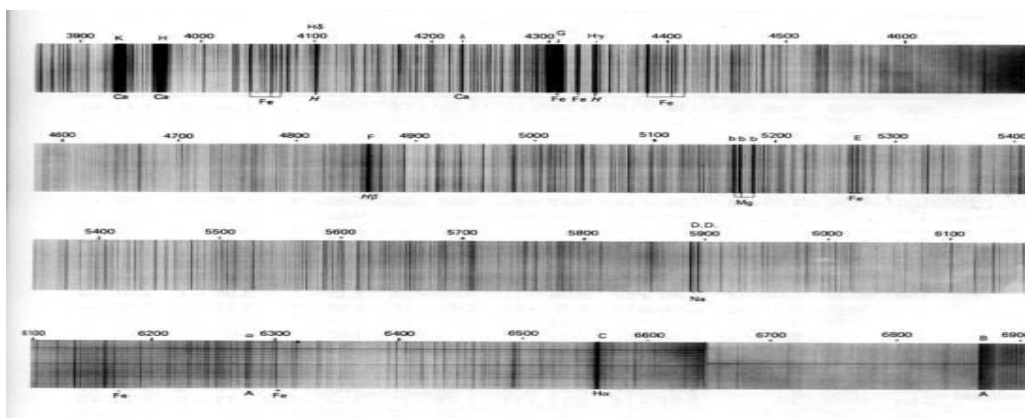


Figura 3 - Espectro Solar de absorção na banda de comprimentos de onda da luz visível [17]

2.6.2. Balanço energético

Caso a radiação solar não incidisse sobre o planeta, a sua temperatura média seria cerca de -240°C e a água apenas existiria no estado sólido. Deste modo, consegue-se atingir um equilíbrio térmico já que a superfície emite a mesma quantidade de energia que recebe e esta radiação transforma-se em energia calorífica. A razão pela qual a temperatura média terrestre permanece quase inalterada (aproximadamente 15°C) de ano para ano deve-se ao facto de estar quase em perfeito equilíbrio com o “ambiente” que a rodeia. A quantidade de energia que recebe, por segundo, cada metro quadrado de superfície da camada superior da atmosfera, exposto perpendicularmente à radiação solar designa-se por “constante solar” e apresenta um valor aproximando de 1360W/m^2 . Este valor não é constante durante o ano devido à órbita terrestre apresentar uma forma elíptica, a respectiva variação na distância entre a Terra e o Sol e sendo que essa energia também se perde devido à absorção, à reflexão e à difusão.

A absorção é mediada pelo ozono que, na estratosfera, absorve grande parte da radiação ultravioleta; outra parte da radiação solar é absorvida pelo vapor de água, pelo dióxido de carbono, pelas poeiras e pelas nuvens. É nas regiões cobertas de gelo, através das nuvens e na superfície terrestre, que outra parte da radiação solar se perde, mas através da reflexão; este fenómeno consiste na mudança da direcção de propagação da radiação, ou seja, no retorno à região de onde proveio através do contacto com a superfície reflectora. No processo de difusão, a radiação solar é dispersa em todas as direcções no espaço exterior, embora uma parte atinja indirectamente a superfície terrestre – radiação difusa.

A radiação total que atinge a superfície da Terra (Figura 4) é constituída pela radiação solar directa (32%) e pela radiação difusa (16%), medindo-se habitualmente em *Langley* ($1\text{ly}=41840\text{J/m}^2$).

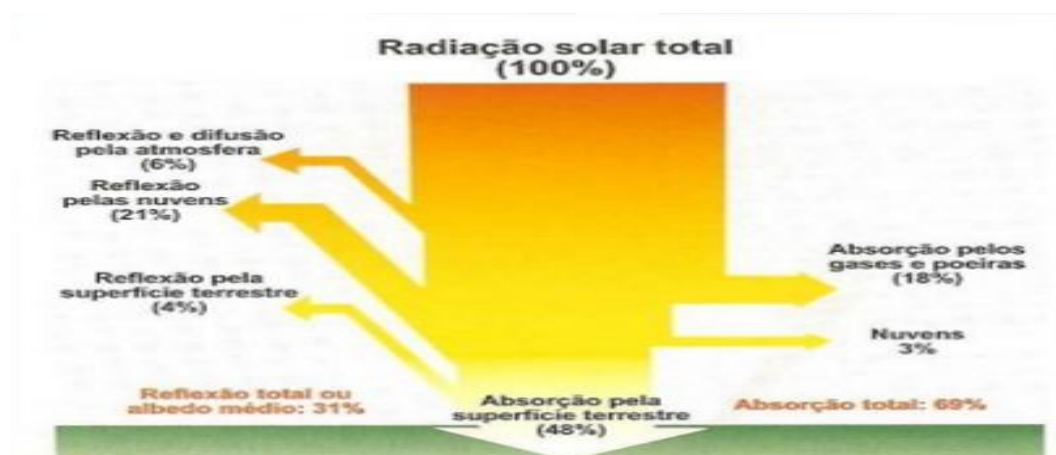


Figura 4 - Perdas de radiação [19]

Se o calor que escapa do interior da Terra em virtude da radioactividade for desprezado, a quase totalidade do calor que a atmosfera recebe provem, directa ou indirectamente, do Sol [18], [19].

2.7. Radiação Solar em Portugal

O nosso país situa-se no hemisfério norte do globo e com uma latitude compreendida entre os 32 e os 42°.

No solstício de inverno (Dezembro), o Sol incide verticalmente sobre o trópico de Capricórnio, a superfície recebe uma quantidade de energia solar menor e os dias são mais pequenos, já que a inclinação dos raios solares é maior. No solstício de verão (Junho), o Sol incide perpendicularmente sobre o trópico de Câncer, a superfície recebe uma quantidade de energia solar maior e os dias têm maior duração devido ao maior tempo de exposição aos raios solares, já que a inclinação dos raios solares é mais pequena [20].

2.8. Distribuição da Radiação Solar na Superfície Terrestre

A quantidade de energia que atinge a superfície terrestre não é constante, pois varia com ângulo de incidência dos raios solares, consoante o hemisfério, entre outros factores. Assim, o ângulo formado pelo Zênite e pelos raios solares é o Ângulo Zenital (Figura 5):



Figura 5 - Ângulo Zenital

Quanto maior for o ângulo zenital, menor será a irradiância solar. A Lei do Coseno de Lambert exprime essa relação, na superfície terrestre (Equação 1):

$$I_z = S \cdot \cos Z_h \quad (1)$$

Onde S é a constante solar e Z_h o ângulo zenital em determinado instante (Equação 2):

$$\cos Z_h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H \quad (2)$$

- φ representa a latitude;

- δ representa a declinação: $\sin \delta = \sin 23,5^\circ \times \sin\left[\frac{360}{365.25} \times (d - 81)\right]$, com d a dizer respeito ao número do dia do ano;

- H representa o ângulo horário: $H = \pm 15 \times t$, com t o número de horas antes ou depois do meio-dia solar ($H = 0$); é negativo antes do meio-dia solar e positivo depois.

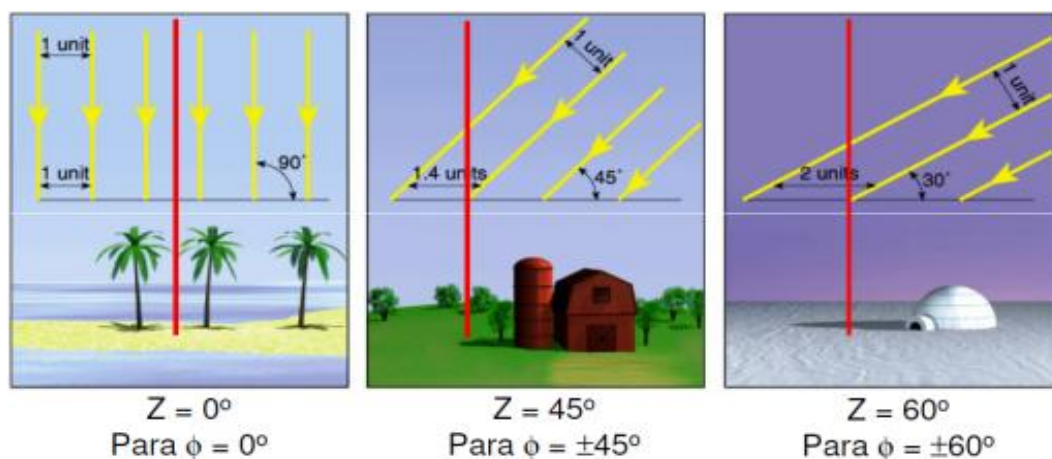


Figura 6 - Variação do ângulo zenital em diferentes latitudes; a linha vermelha representa o zénite do local

Como tal, percebe-se que a radiação solar varia ao longo da latitude, do ano e do dia. A Figura 7 serve para ilustrar, de um modo geral e não para um local específico, um exemplo desta variação no solstício de inverno (SI), nos equinócios (EQ) e no solstício de verão (SV):

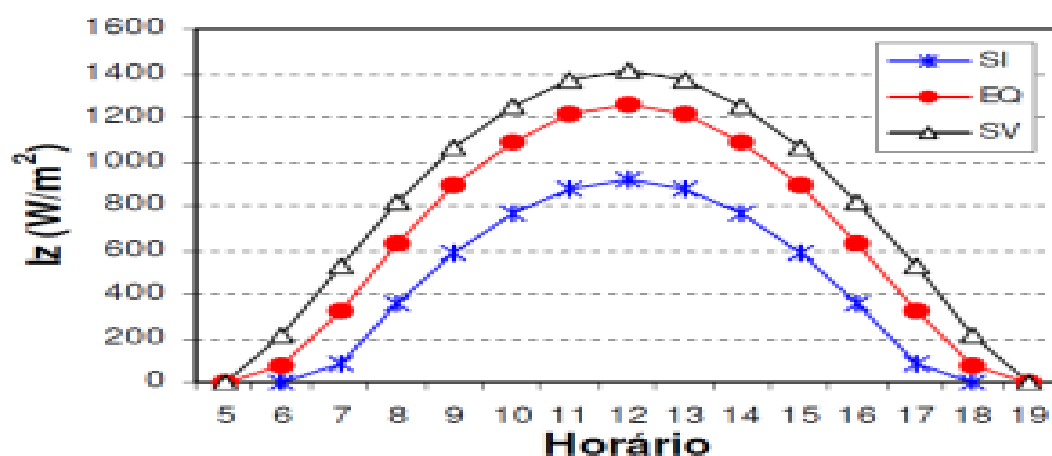


Figura 7 - Exemplo da variação da radiação solar

2.9. Lei de Wien

Esta lei diz que o produto entre a temperatura do corpo e o comprimento de onda para a intensidade da radiação electromagnética máxima é uma constante: $2,8977685 \times 10^{-3} \text{ m.K}$ (Figura 8).

O comprimento de onda é inversamente proporcional à temperatura (Equação 3):

$$T \times \lambda_{\text{max}} = 2,8977685 \times 10^{-3} \text{ m.K} \quad (3)$$

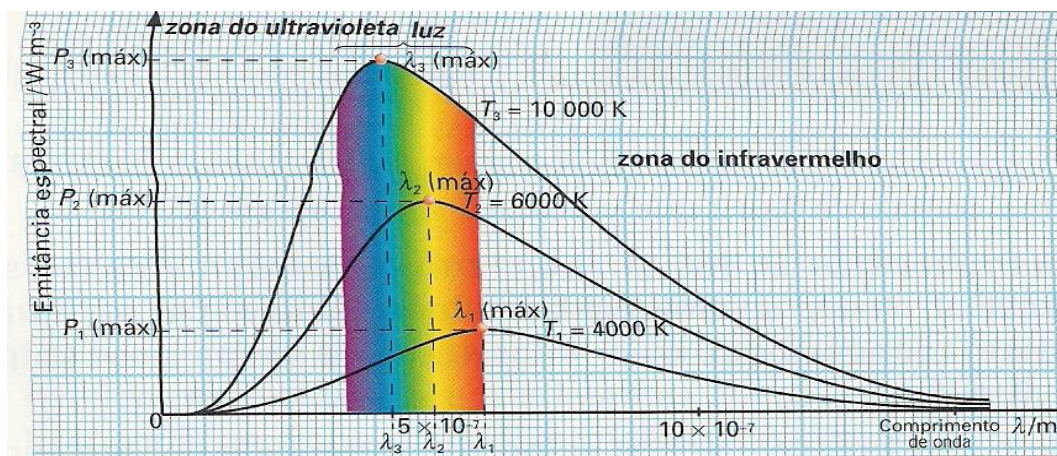


Figura 8 - Relação entre a potência e o comprimento de onda

É possível verificar que quanto menor for a temperatura, maior será o comprimento de onda de máxima emissão. Deve-se ao facto dos comprimentos de onda emitidos pela Terra ($T=300\text{K}$) sejam considerados “ondas longas”, enquanto os comprimentos de onda emitidos pelo sol ($T=6000\text{K}$) sejam considerados “ondas curtas”.

2.10. A radiação terrestre

Entende-se como a radiação emitida pela superfície terrestre, com grande comprimento de onda. Assim, através da Lei de *Wien*, facilmente se percebe que a superfície terrestre apresenta uma temperatura a rondar os 15°C e os comprimentos de onda da radiação terrestre situam-se maioritariamente no intervalo do infravermelho. A Terra é a maior fonte de calor para a atmosfera, uma vez que a atmosfera é mais absorvente para radiação terrestre (ondas longas) bastante transparente à radiação solar (ondas curtas).

A maior parte dos comprimentos de onda da radiação terrestre são absorvidos principalmente pelas nuvens (que reflectem insignificantes quantidades de radiação solar, ao contrário da radiação solar que é bastante reflectida), mas também pelo dióxido de carbono e pelo vapor de água. Estes componentes têm especial importância na manutenção da temperatura terrestre. Por exemplo, bastantes nuvens absorvem bastante e irradiam de volta. Deste modo, quando o céu está limpo a radiação terrestre “escapa-se”; por outro lado, quando a radiação é absorvida, esta é irradiada novamente para a superfície terrestre e, de igual modo, emitida até certa parte retornar à atmosfera e assim sucessivamente. É assim originado o “Efeito de Estufa” [16], [21].

2.11. Variação da quantidade de energia

A quantidade de energia recebida (bem como as respectivas temperaturas), para além de alguns factores já referidos acima, depende também de outros:

2.11.1. Latitude

O ângulo entre os raios e uma tangente à superfície no ponto de observação indica a altitude do sol: quanto mais perpendiculares são os raios, mais intensos se apresentam; quanto maior for a latitude, menor será a temperatura, ou seja, a temperatura diminui do Equador para os pólos; quando a latitude é zero (Equador) os raios são extremamente perpendiculares e atingem-se os níveis máximos de insolação; nos pólos os raios apresentam maior inclinação e verifica-se uma maior dispersão de energia (Figura 9):



Figura 9 - Interferência da latitude na variação da quantidade de energia [21]

2.11.2. Período do ano

A órbita da Terra apresenta uma forma elíptica; quando a Terra está mais próxima do Sol (periélio) a insolação é maior; quando a Terra está mais afastada do Sol (afélio) a insolação é menor (Figura 10):



Figura 10 - Interferência da órbita da Terra na variação da quantidade de energia [21]

2.11.3. Duração dos dias

O hemisfério voltado para o Sol apresenta dias mais longos (maior insolação); dependente das estações do ano (solstícios e equinócios); diferente entre os dois hemisférios (Figura 11) [21]:

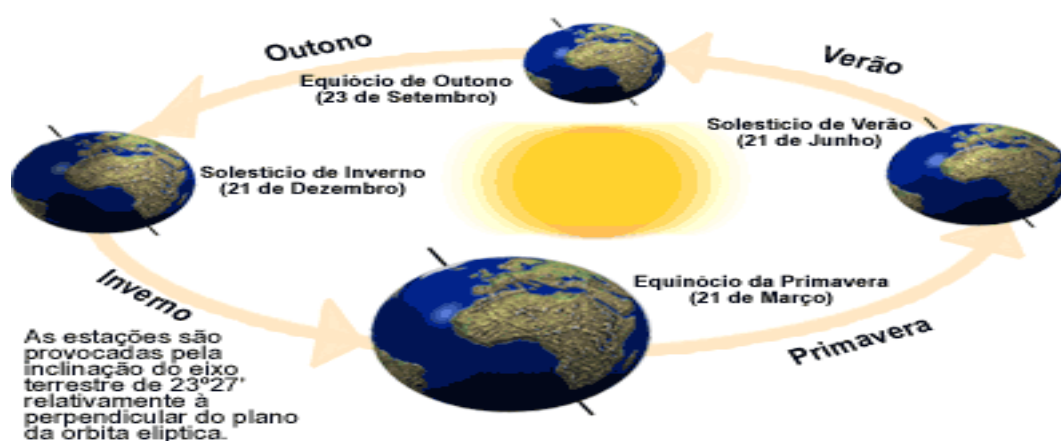


Figura 11 - Interferência da duração dos dias na variação da quantidade de energia [21]

3. Tipos de Medições

As propriedades e o comportamento dos vários componentes atmosféricos e da radiação solar são obtidos com a utilização de instrumentos diferentes e baseados sobre duas técnicas de medição: medições *in situ* e detecção remota. Neste capítulo serão explicadas as duas técnicas.

3.1. Medições *in situ*

As medições *in situ* são realizadas em contacto com o meio que se pretende estudar, medindo directamente as grandezas que se querem conhecer. A amostragem pode ser feita em local fixo ou móvel, com observações em terra (*groundbased*), navios (*shipborne*) ou em altitude com observações aerológicas a bordo de balões atmosféricos ou a partir de aviões (*airborne*). Analisadores de gases, termómetros, barómetros, anemómetros e sensores de humidade são exemplos de instrumentos que fazem medições *in situ*. Na Figura 12 podem ver-se fotos de alguns destes instrumentos [22]:



Figura 12 - Tipos de medições *in situ* [22]

3.2. Detecção remota

Esta técnica teve início com a invenção da câmara fotográfica que foi o primeiro instrumento utilizado e que dura até os dias de hoje. As aplicações militares quase sempre estiveram à frente no uso de novas tecnologias, e neste caso não foi diferente.

Foi desenvolvida, no século passado, uma leve câmara fotográfica com disparador automático e ajustável. Essas câmaras, carregadas com pequenos rolos de filmes, eram fixadas ao peito de pombos-correios e que eram levados para locais estrategicamente escolhidos de modo que, ao se dirigirem para o local de origem, sobrevoavam posições inimigas. Durante o percurso, as câmaras, previamente ajustadas, tiravam fotos da área ocupada pelo inimigo. Deste modo, as fotos obtidas consistiam em valioso material informativo, para o reconhecimento das forças militares inimigas. No processo evolutivo das aplicações militares, os pombos foram substituídos por balões não tripulados que, presos por cabos, eram suspensos até a uma altura suficiente para a tiragem de fotos das posições inimigas por meio de várias câmaras fixadas ao balão. Posteriormente, foram utilizados aviões como veículos para o transporte das câmaras. Na década de 60 surgiram os aviões norte americanos de espionagem denominados *U2*. Estes aviões, ainda hoje utilizados em versões mais modernas, são conduzidos apenas por um piloto e estão totalmente repletos de sensores, de câmaras e de uma grande variedade de equipamentos. A grande revolução da detecção remota aconteceu no início da década de 70, com o lançamento de satélites com recursos naturais terrestres. Estes, embora demandem grandes investimentos e muita energia nos seus lançamentos, orbitam em torno da Terra por vários anos. Durante a sua operação o consumo de energia é mínimo, pois são mantidos a grandes altitudes onde não existe resistência do ar e a pequena força gravitacional terrestre é equilibrada pela força centrífuga do movimento orbital do satélite. Estes acontecimentos espaciais permitem executar um processo contínuo de recolha de imagens da superfície terrestre durante 24 horas/dia [23].

Posto isto, detecção remota é o conjunto de técnicas que possibilita obter informações sobre determinados alvos na superfície terrestre, através do registo da interacção da radiação electromagnética com a superfície, realizadas por sensores. Estes sensores estão maioritariamente colocados em plataformas orbitais ou em satélites, em aviões ou a nível de campo, sendo a NASA uma das maiores captadoras. A definição mais usual é a de Avery e Berlin, em 1992 e de Meneses, em 2001: "técnica para obter informações sobre objectos através de dados recolhidos por instrumentos que não estejam em contacto físico com os objectos investigados". Por não haver contacto físico, a forma de transmissão de dados é realizada através da radiação electromagnética, pois esta é a única forma de energia capaz de se propagar pelo vácuo [24]. Cabe aos sensores, instrumentos principais nesta matéria, a captação desta radiação e conversão para uma forma que possibilite análises e interpretações.

Ao produto final atribuem-se características básicas que definem a capacidade de distinguir respostas (em forma de radiação electromagnética) do objecto em estudo, ou seja, as diferentes resoluções a que está sujeito [25], [26].

3.3. Fundamentos da Espectrometria

Espectrometria é a técnica usada para medir a distribuição espectral de potência da radiação emitida por uma fonte. A radiação deve ser separada em bandas de comprimentos de onda e, cada uma dessas bandas, medida separadamente. A curva da intensidade luminosa em função do comprimento de onda fornecerá então informação sobre as características espectrais da fonte. A radiação medida pode ser descrita por várias maneiras diferentes, dependendo de como é colectada a radiação que entra no espectrómetro e de como esta é processada pelo sistema. Assim, por exemplo, realiza-se uma medição física objectiva em unidades radiométricas para cada comprimento de onda e o resultado pode ser convertido de modo a mostrar como a radiação é percebida pelo olho humano em termos de luminosidade [27].

4. Calibração Radiométrica

As câmaras CCD (*Charge Coupled Device*) são utilizadas em vários instrumentos para medição da radiação solar e para o estudo de parâmetros físicos importantes, como a radiância e a irradiância, a existência de nuvens ou a presença de gases.

A calibração radiométrica consiste em relacionar a intensidade dos *pixéis* que formam a imagem obtida a um parâmetro físico. Refere-se a um conjunto de técnicas que são aplicadas durante o processamento de dados de detecção remota e inclui correcções relacionadas com a sensibilidade do sensor, com a topografia e o ângulo do sol e com a dispersão atmosférica e a absorção. Na prática, o sinal analógico recebido pelos aparelhos de medida, depois de uma conversão do sinal eléctrico em valores digitais, tem de ser transformado numa grandeza física através de uma constante de proporcionalidade oportunamente calculada. A sensibilidade da câmara depende do filtro, dos modos de funcionamento do instrumento e da sua temperatura. Além disso, a câmara pode ter uma resposta não linear.

Normalmente é utilizada uma fonte de luz cuja irradiância em função da distância é conhecida pelos padrões do NIST.

5. Configuração Instrumental

Neste capítulo será feita uma descrição sobre todos os instrumentos utilizados para realizar as medições, como as características ou o funcionamento. A Figura 13 mostra o esquema do procedimento experimental.

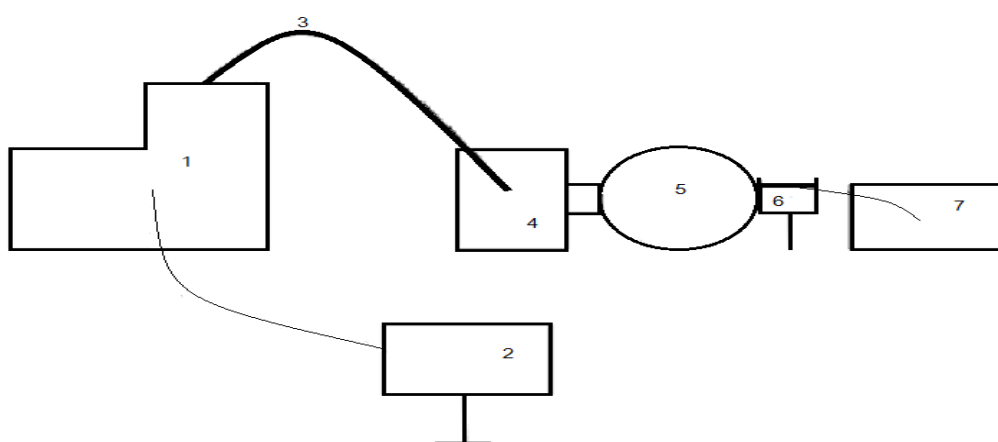


Figura 13 - Ilustração do circuito: 1-SPATRAM2; 2-DAS Interface; 3-Fibra Óptica; 4-VELOD; 5-Esfera de Integração; 6-Lâmpada; 7-Controlador;

5.1. SPATRAM/SPATRAM2

O SPATRAM (*S*pectrometer for *A*tmospheric *T*Racers *M*onitoring) (Figura 14) é um espectrómetro ultravioleta-visível com várias finalidades, que varia entre os 250 e os 950nm. O instrumento está dividido em duas unidades: a de controlo electrónico (ECU - *E*lectronic *C*ontrol *U*nit) e a de mecânica óptica (OMU - *O*ptical *M*echanical *U*nit). Este está contido numa caixa de isolamento térmico que garante uma temperatura constante no interior do instrumento (tipicamente 15°C).

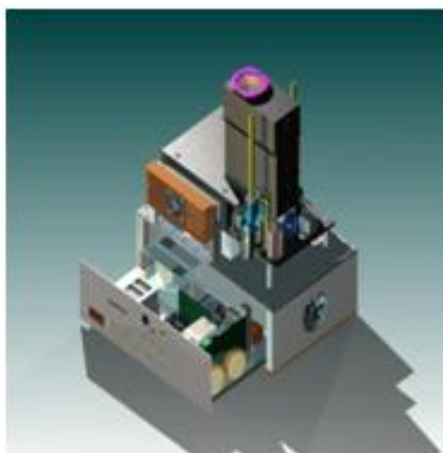


Figura 14 - SPATRAM [29]

Está instalado no ICT da Universidade de Évora e é utilizado para realizar medições da radiação dispersa de zénite, o chamado "modo passivo", a fim de recuperar o conteúdo vertical de alguns componentes atmosféricos como o ozono, o dióxido de azoto, o monóxido de bromo, o formaldeído, entre outros. O SPATRAM pode realizar medições também em "modo activo", usando uma lâmpada estabilizada como fonte de radiação.

O SPATRAM pode efectuar mediadas de radiação através de três entradas: uma directamente apontada para o zénite e duas que acedem ao exterior através de fibras ópticas. Todos estes acessos consistem num conjunto de espelhos planos e esféricos, que focam a radiação sob uma fenda de entrada pela unidade dispersiva composta por uma rede de difracção de 1200ranhuras/mm. O instrumento é composto também por uma câmara CCD que proporciona a aquisição dos sinais analógicos e a conversão em digital. O sensor é mantido a -20°C , a fim de conseguir uma maior razão sinal-ruído (SNR – *Signal to noise ratio*). Outros módulos importantes que compõem o sistema são: os filtros passa-banda que seleccionam o intervalo espectral da radiação que entra no módulo de dispersão do sinal; uma lâmpada de mercúrio dedicada à calibração espectral e uma lâmpada de halogéneo (não calibrada) para verificar a linearidade do sensor CCD. O software DAS (*Data Acquisition System*) é a aplicação que permite a gestão de todo o instrumento e será apresentada em detalhe mais à frente [29], [30].

Neste trabalho é utilizado o SPATRAM2 (Figura 15), construído em 2012 e utilizado em várias campanhas de medidas em Portugal. A maior diferença entre os dois instrumentos é a eliminação da entrada directa da radiação através da posição zenital. O par de espelhos plano e esférico também foram substituídos por uma outra

entrada de fibra óptica. Além disso, no SPATRAM2 é utilizado um novo controlador do sensor CCD e um sensor CCD com uma tecnologia "*front illuminated*", em vez de "*back illuminated*" como no instrumento SPATRAM.

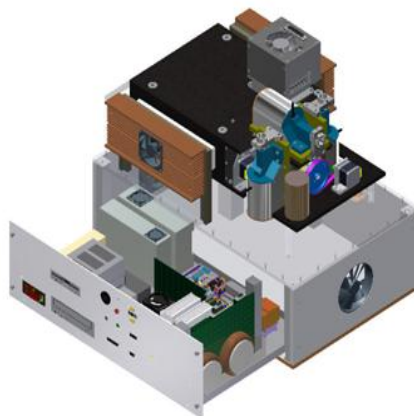


Figura 15 - SPATRAM2

5.2. Data Acquisition System (DAS)

O DAS apresenta uma interface gráfica para toda a monitorização e controlo do equipamento, incluindo qualquer tipo de medição (Figura 16):



Figura 16 - DAS GUI realizando medições

Da esquerda para direita podem ser identificadas cinco colunas onde se encontram: i) botões (coluna esquerda), que fornecem os movimentos aos dispositivos ligados aos seis motores de passo instalados no sistema; ii) parâmetros da OMU, que contêm informações carregadas no arranque do DAS a partir dos ficheiros de configuração; iii) estado da OMU, nomeadamente o estado dos componentes da câmara CCD, dos motores de passo e da actividade em uso; iv) estado dos dispositivos móveis e as temperaturas do sistema; v) botões (coluna da direita), que servem principalmente para o controlo das medições. Abaixo das colunas existem ainda: o 1º Indicador de estado, onde indica a estação na qual se efectua a medição, a data, a hora e o ângulo de zénite; 2º Indicador de estado, onde indica a elevação do sol, o ângulo de azimute, as horas de nascer e por do sol e o estado do programa [43].

Este sistema pode ser utilizado também num computador normal (não ligado ao instrumento), permitindo assim de visualizar as medidas espectrais obtidas, realizar uma pré-análise dos dados espectrais, testar as funcionalidades do programa, aprender a usar o programa e usar alguns recursos do mesmo. A Figura 17 mostra o conjunto em execução no laboratório.

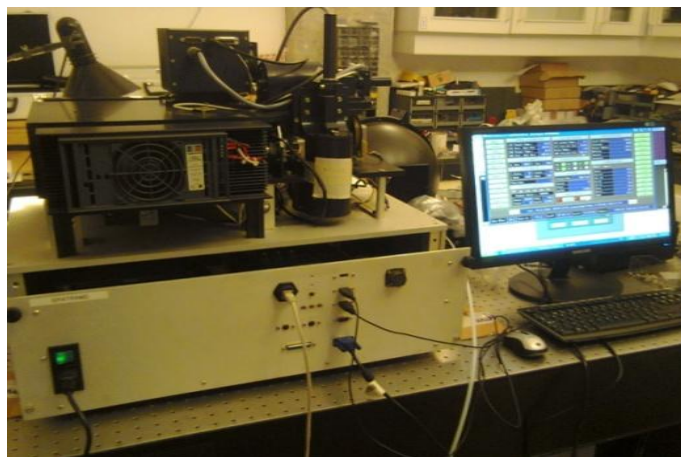


Figura 17 - Conjunto SPATRAM2 - Interface

As medições podem ser obtidas em modo manual, no qual o operador escolhe o tipo de medições e quando realizá-las, e no modo automático, que não necessita de um operador na proximidade do instrumento. As medições são armazenadas em arquivos binários ou com o formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). O programa pode ser executado em computadores equipados com Win9x, Win2000, WinXP, Win7 e o código é compilado com a Microsoft Visual C++ 6.0 [29], [42].

5.3. Fibra Óptica

É um filamento extremamente fino e flexível utilizado como condutor de um elevado rendimento de luz, imagens ou impulsos codificados. Geralmente é feito de vidro, plástico ou outro tipo de isolante eléctrico. Apresenta um diâmetro de alguns micrómetros, sensivelmente maior do que um cabelo humano e é composto por uma capa protectora, uma interface e um núcleo. Pode-se imaginar como um longo canudo, cuja superfície interna é revestida com um espelho perfeito de vidro, de modo a que a luz consiga atravessar com a maior nitidez possível através da reflexão no seu interior [36] - [38].

As fibras ópticas consistem num núcleo central transparente, composto por um fio de vidro puro (125 μ m de diâmetro nas fibras mais comuns e dimensões ainda menores em fibras mais sofisticadas) e com determinado índice de refacção. Este núcleo está revestido numa casca, cuja camada apresenta um índice de refacção menor, e é a diferença entre os índices de refacção da casca e do núcleo que possibilita a reflexão total e a consequente manutenção do feixe luminoso no interior da fibra (Figura 18). A diferença entre os índices de refacção do núcleo e da casca é obtida usando-se materiais distintos. Essa diferença caracteriza o chamado “perfil de índices da fibra óptica”. À sua volta existe ainda uma capa feita de material plástico para proteger o interior contra possíveis danos [39].

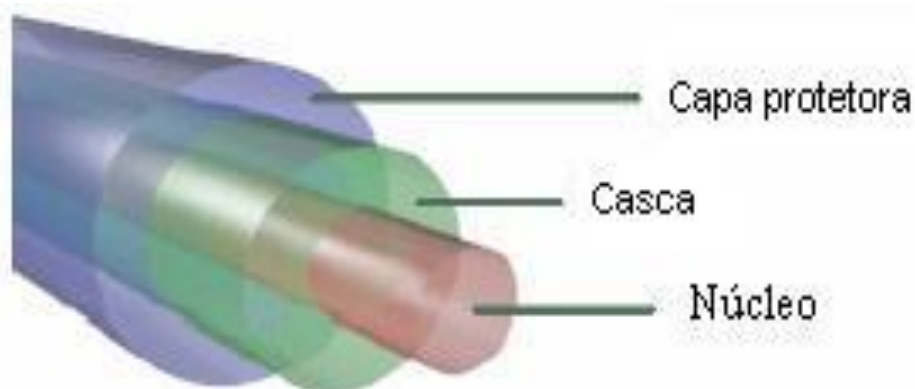


Figura 18 - Composição de uma fibra óptica [39]

Para entender o funcionamento de uma fibra óptica, é necessário ter em conta os conceitos de reflexão e refacção da luz. São exactamente estes modos de propagação da luz que acontecem com a utilização de uma fibra óptica: a luz viaja de uma extremidade à outra da fibra, através dos fios de vidro, e reflectindo-se várias

vezes nas paredes do interior. A transmissão da luz segue um princípio único, independentemente do tipo de material utilizado: este feixe é mandando o de volta para o núcleo, consoante as características do meio e em forma de reflexões sucessivas (zigzagues). Ou seja, a luz é mantida no núcleo através de reflexão interna total (Figura 19) e isto faz com que a fibra funcione como guia de onda, transmitindo luz entre as duas extremidades. Tudo isto acontece devido aos diferentes níveis de refração entre o núcleo e o revestimento [37], [38].

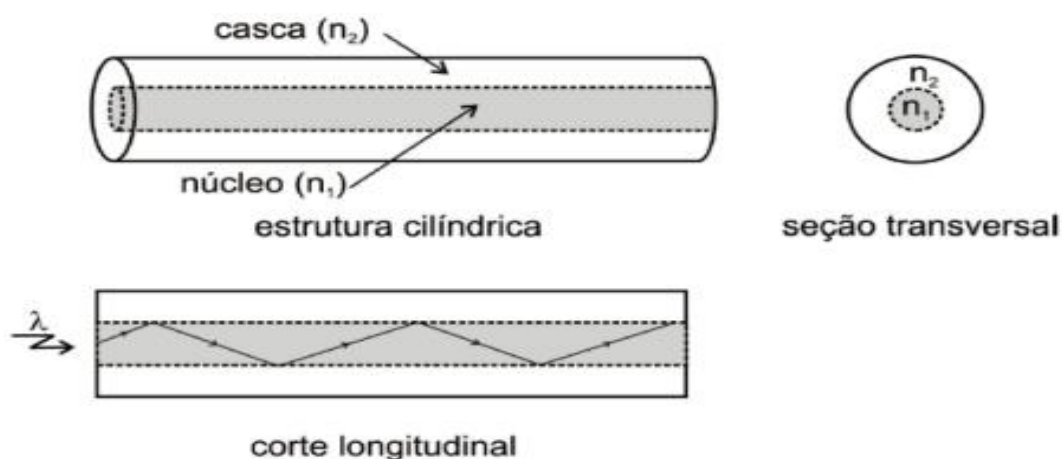


Figura 19 - Propagação de um raio de luz dentro de uma fibra óptica [37]

Toda a fibra óptica tem como principal característica um ângulo de aceitação, isto é, um ângulo limite de incidência da luz em relação ao eixo, para que esta penetre no cabo. Os feixes de luz com um ângulo superior ao de admissão não satisfazem as condições para a reflexão total e, portanto, não são conduzidos. Esse ângulo limite define um cone de aceitação de luz e pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$\theta_a = \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}\right) \quad (4)$$

onde n_0 é o índice de refração do meio externo à fibra, n_1 é o índice de refração do núcleo e n_2 é o índice de refração da casca. A partir da definição do ângulo de aceitação, define-se a “abertura numérica” da respectiva fibra. É um parâmetro muito utilizado para calcular a sua capacidade de captar e transmitir luz. Quanto maior for o ângulo de aceitação, maior é o diâmetro requerido para a fibra. Se o diâmetro for grande, a fibra pode admitir a entrada de vários raios luminosos e essas diferentes possibilidades de propagação pela fibra são denominadas modos [39]. As maior vantagens e desvantagens no uso das fibras ópticas são resumidos na Tabela 1 [40]:

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do uso de fibras ópticas

Vantagens	Desvantagens
Dimensões Reduzidas;	Fragilidade das fibras ópticas sem encapsulamento;
Capacidade para transportar grandes quantidades de informação;	Dificuldade para conexão e ramificações;
Imunidade às interferências electromagnéticas e ruídos;	Impossibilidade de alimentação remota dos repetidores;
Matéria-prima muito abundante;	Falta de padronização dos componentes ópticos.
Segurança no sinal;	
Facilidade relativa na instalação;	
Perdas de informação extremamente baixas.	

A maior utilização de fibras ópticas verifica-se essencialmente nos ramos da medicina e das telecomunicações. Ao nível da medicina, usa-se em aparelhos de endoscopia e em cirurgias mais específicas, nas quais o médico consegue visualizar os órgãos internos. Quanto às telecomunicações, a fibra óptica é utilizada para transmitir sinais através de pulsos electromagnéticos [41].

Neste trabalho foram utilizadas diferentes tipos de fibras ópticas que se encontravam no laboratório: duas líquidas com o diâmetro do núcleo de 3 e 5mm e duas de quartzo com as mesmas dimensões do núcleo (3 e 5mm).

5.4. *VErtical L*ooking *D*evice - VELOD

O VELOD (Figura 20), semelhante às entradas de fibras do instrumento, é um pequeno telescópio composto por um espelho plano elíptico com um buraco no centro e um espelho esférico colocado à distância necessária para concentrar a radiação recebida do espelho plano no centro desse próprio espelho. A uma distância de 2mm atrás do espelho é colocada uma fibra óptica e o sinal da radiação é levado a uma das entradas de fibra ópticas presentes no SPATRAM2. Este sistema óptico está contido numa caixa de vácuo com o objectivo de evitar condensações na janela de quartzo de 70mm para o ingresso da radiação. A janela tem uma inclinação de 10°, de modo a que não se acumule água sobre ele [35].



Figura 20 - VELOD em laboratório

Dependendo do tipo de fibra óptica, são utilizados tipos de espelhos esféricos e montagens mecânicas diferentes: em caso de fibras ópticas líquidas (um tipo de fibra particular que contem um fluido de alta transmissividade na região espectral UV) que possui uma abertura numérica de 0,44, é usado um espelho esférico de 120mm de raio e posto a 58mm do centro do espelho plano; uma fibra de quartzo com abertura numérica de 0,22 precisa de um espelho esférico de 240mm de raio e posto a 116mm do espelho plano. A fibra óptica pela recepção do sinal, esta colocada 2mm atrás a superfície do espelho plano.

5.5. Esfera de Integração OL Series 455

A Esfera Integradora OL Series 455 (Figuras 21 e 22) foi calibrada através da Luminância e da Temperatura de Cor Correlacionada (TCC) (entre 2000K a 3000K), de acordo com os padrões fornecidos pelo(NIST).

A luminância é definida por fabrico para ler directamente em unidades de *footlamberts* (fL) ou *candelas* por metro quadrado (cd/m^2). Varia pelo ajustamento da abertura, controlada pelo micrómetro, e embora a tolerância mecânica para a abertura seja bastante elevada, a exactidão e a precisão da luminância exibida baseiam-se na estabilidade. É ajustada com a fonte funcionando a 2856K e com uma configuração semelhante à radiação espectral. A estabilidade a longo prazo na calibração fotométrica da OL 455 está dependente da estabilidade do sensor fotométrico montado na parede da esfera e não da estabilidade da saída fotométrica da lâmpada ou na eficiência do revestimento da esfera.

A TCC baseia-se na distribuição espectral da fonte da esfera ao longo do espectro visível. Os principais factores que contribuem para a variação da potência

espectral são alterações na distribuição de lâmpada e eficiência espectral da esfera de integração. A fim de manter uma determinada corrente na lâmpada, a sua tensão deve ser aumentada. Assim, esta fica mais brilhante (TCC aumenta). A TCC da fonte é uma função da corrente na lâmpada, cujo valores de corrente versus TCC são apresentados no controlador. A corrente da lâmpada pode ser definida com uma resolução de 0,001A.



Figura 21 - Esfera Integradora no laboratório

A esfera de integração é revestida com um material altamente reflectivo e produz uma fonte de luminância quase perfeita. Devem ser tomados cuidados para que o interior da esfera não seja contaminado e, quando já não estiver em uso, a tampa da porta de saída deve ser aplicada. Um obturador está localizado entre a luz e a porta de entrada da esfera de integração, permitindo a saída de luminância/radiância para ser alternado entre zero e qualquer nível desejado. Um porta-filtro opcional, montado na porta de saída, acomoda alvos de alinhamento, filtros, difusores de acoplamento, etc. para as necessidades específicas do utilizador [32], [33].

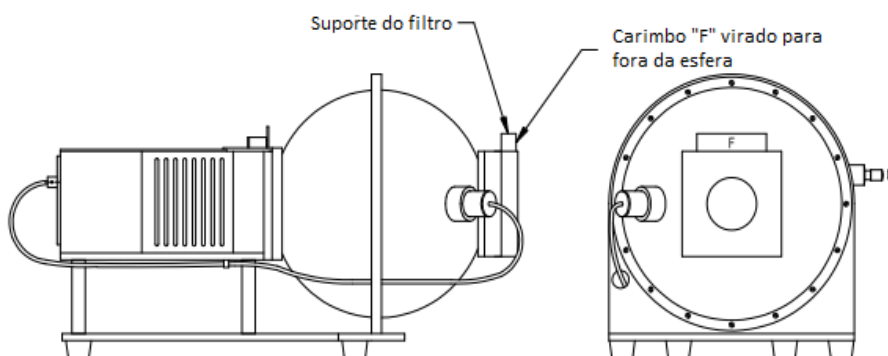


Figura 22 - Esquema da Esfera Integradora [32]

5.6. Lâmpada OL Series 220

A lâmpada de halogéneo OL Series 220 (Figura 23) com 200W é calibrada sobre toda a gama entre os 250 e os 2500nm de comprimento de onda. Esta apresenta altos padrões de precisão, que têm uma incerteza em relação aos valores do NIST entre ± 1 e 2%. Os valores da luminância, da temperatura de cor e da cromaticidade também são fornecidos com esses padrões calibrados ao longo do espectro visível. A escala do NIST tem uma incerteza de 0,63% no visível, 1,56% no ultravioleta a 250nm e de 0,31% no infravermelho a 2000nm [31].



Figura 23 - Lâmpada de halogéneo OL Series 220 [31]

5.7. Controlador OL 400-C

O Controlador (Figura 24) é projectado para operar os padrões de calibração das esferas integradoras que são recomendadas para calibrar microfotómetros, intensificadores de imagem, telefotómetros e espectralradiómetros. A potência da lâmpada de alimentação é altamente regulada e com uma precisão constante da fonte de corrente contínua. Ela é optimizada para a estabilidade da fonte e precisão e especificamente projectada para operar a lâmpada nas esferas de integração. Um medidor do tempo decorrido é activo somente quando a lâmpada está acesa para controlar com precisão o seu tempo de funcionamento, o que auxilia na monitorização do número de horas restantes.

Tem como principais características: o facto de ser controlado por um microprocessador, a precisão da fonte de corrente, o *display* com visão de larga escala e com controlo ON/OFF, a asa com inclinação ajustável, aplicação de software com controlo remoto através de um computador incorporado e a interface USB de máxima velocidade. Opera com uma faixa de temperatura entre os 15 e os 35°C e

com uma faixa de humidade entre 10% e 85% (sem condensação). Relativamente ao tamanho, apresenta 30,48cm de comprimento x 23,83cm de largura x 13,67cm de altura; pesa cerca de 7,7kg [34].



Figura 24 - Controlador OL 400-C [34]

6. Procedimento Experimental

Foram realizados cinco ciclos de medições em laboratório e três ciclos no exterior. No laboratório mediu-se o espectro da lâmpada OL 200, com as fibras ópticas referidas na secção 5.8, nas interfaces líquida e de quartzo do SPATRAM2. As medidas realizadas foram as lógicas (fibra óptica líquida na interface líquida e fibra óptica de quartzo na interface de quartzo) e também cruzadas (fibra óptica líquida na interface de quartzo e fibra óptica de quartzo na interface líquida). Todas as medições consideradas foram realizadas de luz apagada para minimizar o ruído. Das cinco medições aqui realizadas, apenas foram consideradas três, porque as características geométricas da transmissão do conjunto VELOD-fibras-SPATRAM2 não permitiram obter medidas significativas. Por exemplo, na medição com a fibra óptica de quartzo na interface líquida a geometria da fibra não batia certo com a do VELOD e com a interface do SPATRAM.

O processo foi então o seguinte:

1. A lâmpada foi colocada a uma distância de 50cm do VELOD, protegida por uma caixa de cartão pintada de negro (Figura 25), de modo a que a totalidade da radiação ficasse concentrada na entrada da esfera de integração. Uma ventoinha de arrefecimento foi aplicada na caixa para manter uma temperatura adequada a que a lâmpada não a queimasse (Figura 26);



Figura 25 - Lâmpada no interior da caixa, esfera de integração e VELOD



Figura 26 - Pormenor da ventoinha e respectiva fonte de alimentação

2. O VELOD foi depois ligado ao SPATRAM através de uma fibra óptica;
3. Em seguida, todos os aparelhos teriam que estar ligados: esfera integradora, controlador e SPATRAM;



Figura 27 - Pormenor do controlador

Deu-se início às medições através da GUI, no modo automático. Foi criado um ficheiro .PRG com as palavras-chave reconhecidas pelo DAS que posicionam a rede de difracção, o espelho da entrada da radiação e realiza ciclicamente a calibração espectral. A Figura 28 representa o ficheiro .PRG utilizado:

```

LABEL "Measurements Table 33378195.PRG"
REM DFMEASURE is a new keyword for the use of the
REM neutral density filter moved with the torque motor
REM DFMEASURE m l f fn a t mt s p
REM where:
REM m = mirror position [0, 1, 2, 3]
REM l = wavelength. The numerical value in Wlstep.ini file (3337, 3850.....)
REM f = filter wheel position [0, ..., 5]
REM fn = neutral density filter [0, 1] 0 = ND Filter NOT active,
REM      1 = ND Filter Activated.
REM a = autoranging (1 = perform autoranging, 0 = do not calculate the
REM      Exp. Time, but use the TExp specified by 't'. In addition if t = 0 the
REM      previously calculated exposure time is used.
REM mt = measurement type (0 = dark meas., 1 = light meas.)
REM s = save the measurement
REM p = plot the measurement ( the measurements are plotted if the option
REM      in the DAS Config is chosen.
REM      This parameter also is maintained for compatibility
REM      with previous versions)H_FILTER
CALIBRA
H_MIRROR
DFMEASURE 1 4358 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 3850 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 3337 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 3850 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 4358 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 4861 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 5332 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 5814 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 6282 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 6734 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 7201 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 7677 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 7201 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 6734 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 6282 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 5814 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 5332 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 4861 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 4358 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 5332 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 4861 0 0 1 0.50 1 1 1
DFMEASURE 1 4358 0 0 1 0.50 1 1 1
NDFILTER 0
BEGIN
XEND

```

Figura 28 - Ficheiro .PRG utilizado

Foram utilizados dois ficheiros .PRG, sendo que a diferença é a posição do espelho (0 para *Zenith* – correspondente a interface pela fibra liquida, 1 para *HorizDX* – correspondente a interface pela fibra de quartzo).

A lâmpada usada, modelo OL220M, era de características conhecidas e já calibrada, com uma intensidade de corrente de 6A e com uma radiação total de $29,54\text{W/m}^2$, no comprimento de onda entre os 250 e os 1100nm (incerteza, em relação aos valores do NIST, entre ± 1 e 2%):

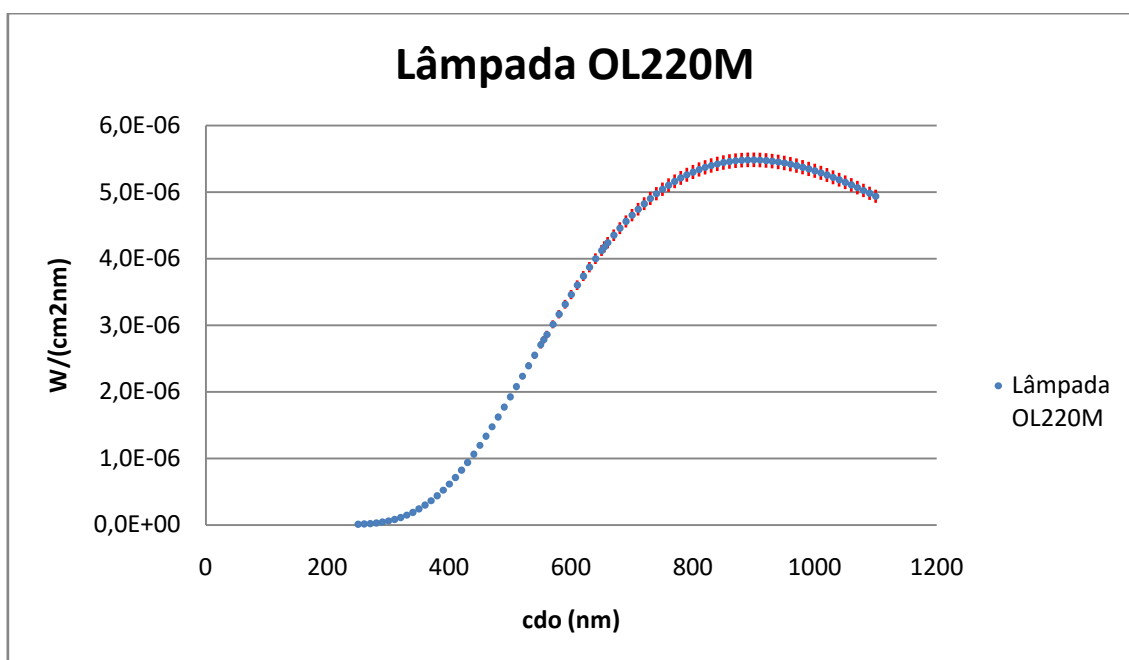


Figura 29 - Potência da lâmpada entre 250 e 1100nm, com barra de erros de 2%

Verifica-se a relação entre o comprimento de onda e a potência da lâmpada/nanómetro e, a partir do qual, é possível encontrar a potência total por área, através de várias integrações.

Foram feitas outras medições no exterior, recorrendo somente ao SPATRAM2 (Figura 30), ao VELOD (Figura 31) e as mesmas fibras ópticas utilizadas no laboratório, recorrendo à radiação solar como fonte de energia. Foram utilizados também os mesmo ficheiro ASCII preparados pelos ciclos de medida no laboratório.

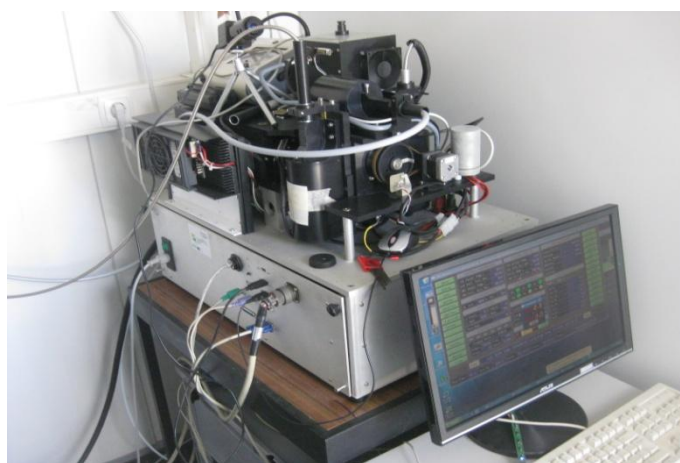


Figura 30 - SPATRAM instalado no contentor no observatório do ICT-UE



Figura 31 - VELOD recebendo a radiação solar

7. Análise dos dados, resultados e discussões

Das medidas efectuadas em laboratório, foram consideradas três configurações:

1ª - a fibra óptica de quartzo de 5mm na interface para as fibras de quartzo;

2ª - a fibra óptica líquida de 5mm na interface para as fibras de quartzo;

3ª - a fibra óptica líquida de 5mm na interface para as fibras líquidas.

As medições foram realizadas com a rede de difracção nos intervalos espectrais representados na Tabela 2, com o respectivo identificativo reconhecido pelo DAS:

Tabela 2 - Intervalos espectrais e respectivo identificativo

Intervalo espectral (nm)	Identificativo
301 - 361	3337
353 - 412	3850
405 - 463	4358
454 - 507	4861
502 - 553	5332
550 - 600	5814
597 - 646	6282
643 - 690	6734
689 - 738	7201
740 - 785	7677

Os ficheiros de dados obtidos são ficheiros binários que, através da utilização de um modo de execução do DAS, são convertidos para ficheiros ASCII, que podem depois ser transformados para uma folha de calculo, como o Excel.

Utilizaram-se dois ficheiros de dados ASCII: cada vez que se media através da interface líquida, usava-se a posição do espelho de entrada em *Zenith*; quando a medição era obtida através da interface de quartzo, a posição do espelho de entrada era *HorizDX*.

No cabeçalho de cada medida (Figuras 32 e 33), verificaram-se os seguintes parâmetros (da esquerda para a direita): na primeira linha: a localização da estação; a latitude; a longitude; a altitude; o ângulo solar zenital; na segunda linha: a data; a hora local (LT); a posição do espelho de entrada; a posição espectral (em Angstrom, por convenção); a posição da roda dos filtros; a temperatura do CCD; o tempo de exposição; os valores do máximo e do mínimo da medição; na terceira linha: tipo de imagem; início da janela do X do CCD; início da janela do Y do CCD; fim da janela do X do CCD; fim da janela do Y do CCD; faixas verticais; número de linhas; quatro parâmetros não utilizados.

```
LOC: ALQ LAT: 38,20 LON: -7,49 ALT[m/asl]:170 SZA:46,48
16/05/2016 15:42:37 LT Zenith 3850 NULL -20,1 0 5,04 59540 0
1 0 0 1023 255 32 7 0 0 0 0
```

Figura 32 - Cabeçalho do ficheiro ASCII para medir através da interface líquida do SPATRAM

```

LOC: ALQ LAT: 38,20 LON: -7,49 ALT[m/asl]: 170SZA:44,47
16/05/2016 15:32:11 LT HorizDX 3337 NULL -18,8 0 11,2 0 56108 0
1 0 0 1023 255 32 7 0 0 0 0

```

Figura 33 - Cabeçalho do ficheiro ASCII para medir através da interface de quartzo do SPATRAM

Ao passar os dados para o Excel, os valores obtidos estavam divididos em nove colunas: a primeira correspondia ao comprimento de onda (em Angstrom), enquanto as restantes oito diziam respeito a diferentes linhas de contagem digital, ao longo de mil e vinte e três *pixéis*. Destas oito, a coluna escolhida para o tratamento dos dados foi a quarta, que uma vez central apresentava uma contagem digital mais apropriada. O Tempo de Exposição de cada medição foi também considerado e evidenciado na Figura 34.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2	Angstrom	cdo (nm)	1a linha	2a linha	3a linha	4a linha	5a linha	6a linha	7a linha	8a linha		Exp time=	0,66 seg	
3	7408,524	740,8524	248	216	180	185	188	175	161	113				
4	7408,998	740,8998	52779	50245	50222	51113	53158	54692	10592	146				
5	7409,472	740,9472	52680	50027	49905	51065	52988	54475	10600	147				
6	7409,946	740,9946	52580	50445	50072	50828	53231	54071	10628	142				
7	7410,42	741,042	52807	50379	50024	50903	52928	54002	10517	147				
8	7410,894	741,0894	52160	49949	49932	50587	53128	54328	10527	167				
9	7411,368	741,1368	52109	50002	49340	50897	52875	53776	10537	150				
10	7411,842	741,1842	52218	49995	49500	50688	52611	54003	10540	153				
11	7412,315	741,2315	52220	49929	49518	50572	52452	53436	10375	139				
12	7412,789	741,2789	51972	50131	49554	50506	52528	53611	10414	140				
13	7413,263	741,3263	52038	49792	49406	50301	52696	53957	10497	138				
14	7413,736	741,3736	52230	50168	49539	50052	52561	53960	10403	156				
15	7414,21	741,421	52217	49748	49430	50345	52543	53645	10413	133				
16	7414,684	741,4684	51858	49754	49373	50388	52433	53677	10327	140				
17	7415,157	741,5157	51853	49892	49728	49689	52055	53354	10202	166				
18	7415,631	741,5631	51652	49916	49297	49947	52152	53529	10353	163				
19	7416,104	741,6104	51796	49594	49375	49949	52457	53519	10268	154				
20	7416,578	741,6578	51938	49506	49120	50014	51988	53383	10293	138				
21	7417,051	741,7051	51436	49746	49666	49886	52365	53250	10177	139				
22	7417,525	741,7525	51662	49484	49159	50021	51959	53491	10200	142				
23	7417,998	741,7998	51312	49594	49245	49795	52270	53568	10255	152				
24	7418,471	741,8471	51306	49632	49244	50111	51835	53202	10235	139				
25	7418,945	741,8945	51390	49465	48946	49585	52017	53199	10119	155				

Figura 34 - Folha de cálculo Excel com os valores das contagens digitais o respectivo Tempo de Exposição

Posto isto, para cada intervalo espectral foi calculada uma curva de ajuste dos pontos de calibração da lâmpada em função dos *pixéis* do sensor, com uma polinomial de grau 2, para obter uma equação que representa a potência da lâmpada para cada *pixel*. As equações para cada intervalo espectral são apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 - Equação da potência da lâmpada em cada intervalo espectral

Intervalo espectral (nm)	Equação
301 - 361	$y = 3,63E-11x^2 - 2,00E-08x + 2,79E-06$
353 - 412	$y = 4,26E-11x^2 - 2,45E-08x + 3,59E-06$
405 - 463	$y = 3,48E-11x^2 - 1,80E-08x + 2,22E-06$
454 - 507	$y = 1,59E-11x^2 - 5,42E-10x - 1,79E-06$
502 - 553	$y = 6,94E-13x^2 + 1,49E-08x - 5,70E-06$
550- 600	$y = -1,39E-11x^2 + 3,11E-08x - 1,02E-05$
597 - 646	$y = -2,24E-11x^2 + 4,12E-08x - 1,32E-05$
643 - 690	$y = -2,76E-11x^2 + 4,79E-08x - 1,53E-05$
689 - 738	$y = -2,84E-11x^2 + 4,90E-08x - 1,57E-05$
740 - 785	$y = -2,57E-11x^2 + 4,50E-08x - 1,43E-05$

Através de uma integração, foi depois possível chegar ao valor da potência da lâmpada/nanómetro, o que permitiu obter o seu valor total da radiância (Tabela 4):

Tabela 4 - Radiância total da lâmpada em cada posição espectral

Posição Espectral (nm)	Radiância total da lâmpada (W/m ²)
333,7	0,09
385,0	0,28
435,8	0,57
486,1	0,86
533,2	1,20
581,4	1,56
628,2	1,84
673,4	2,03
720,1	2,32
767,7	2,29

O valor total destas radiâncias é de 13,04W/m², sendo bastante próximo do valor da potência da lâmpada no intervalo 300-790nm que é de 13,03W/m².

O passo seguinte foi calcular as constantes de proporcionalidade entre as séries espectrais medidas e as equações da Tabela 3. Estas constantes foram conseguidas pela razão entre a potência em cada *pixel* durante o tempo de exposição e o valor digital desse mesmo *pixel* (Equação 5).

$$cte\ prop(pix) = \frac{P(pix) \times CD(pix)}{T\ Exp} \quad (5)$$

onde:

P - potência da lâmpada de calibração por *pixel* (Watt/cm²);

CD - contagem digital por *pixel*;

T Exp - Tempo de Exposição da medida.

Foram então realizados os respectivos gráficos nos quais se observam, ao longo dos vários intervalos espectrais, o valor da contagem digital de cada *pixel*, a potência da lâmpada, o respectivo Tempo de Exposição e destaca-se o comportamento da constante de proporcionalidade. Esta apresenta valores de grandeza cerca de 3ª ordem menor que a potência da lâmpada, então para se poder visualizar ao longo do mesmo eixo a série da lâmpada e a constante de proporcionalidade, esta última foi ajustada com um expoente adequado. No que toca aos eixos dos gráficos, o da esquerda refere-se à contagem digital, o de X ao comprimento de onda (nanómetros) e o da direita à energia recebida, por nanómetro. Quanto à legenda dos gráficos, os pontos azuis (eixo da esquerda) são a contagem digital de cada *pixel*, a vermelho tracejado (eixo da direita) a potência da lâmpada no respectivo comprimento de onda, a preto a linha de tendência da potência da lâmpada e a verde a constante de proporcionalidade (eixo da direita). Em seguida, serão apresentados somente os gráficos do primeiro intervalo espectral de cada ciclo de medição, uma vez que o procedimento foi sempre o mesmo.

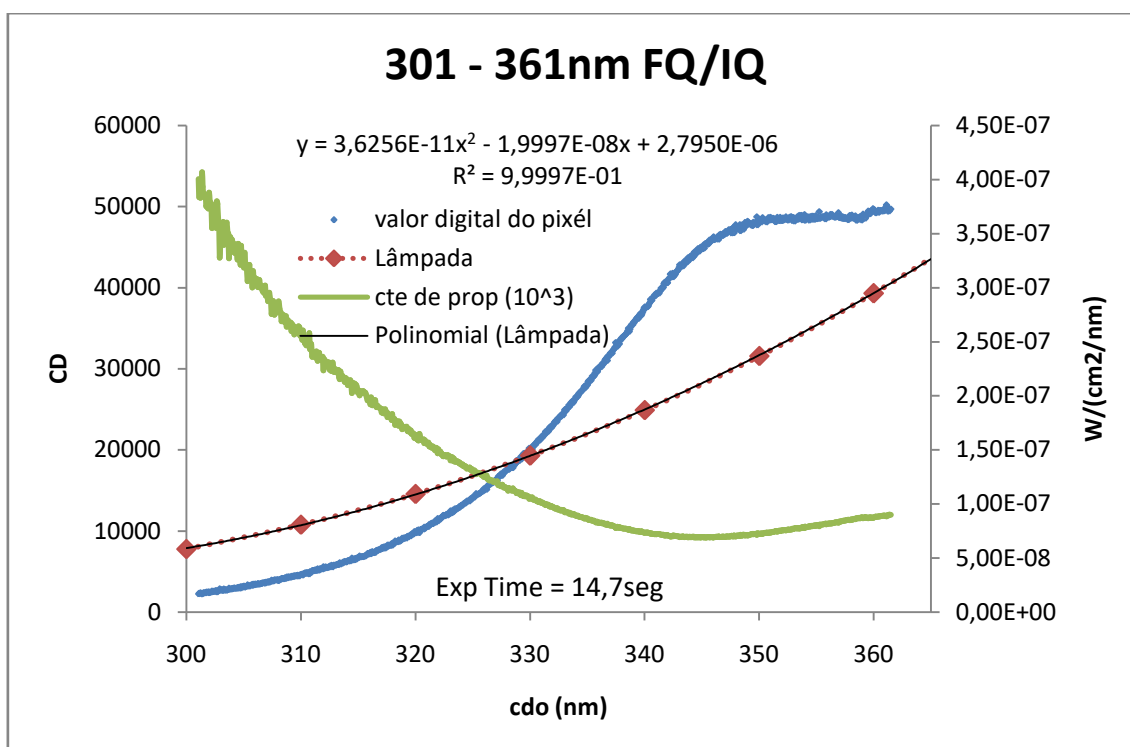


Figura 35 - Primeira medição (VELOD/Fibra Quartzo/Interface Quartzo), em laboratório, no intervalo espectral 301 - 361nm

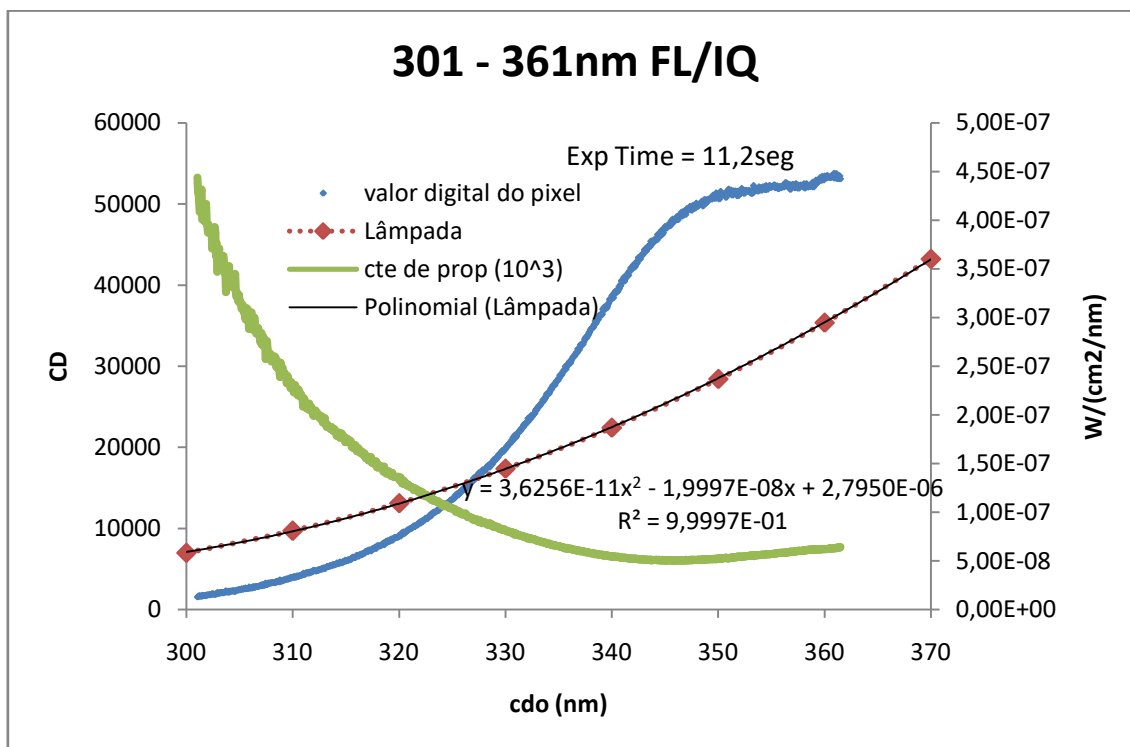


Figura 36 - Segunda medição (VELOD/Fibra Líquida/Interface Quartzo), em laboratório, no intervalo espectral 301 - 361nm

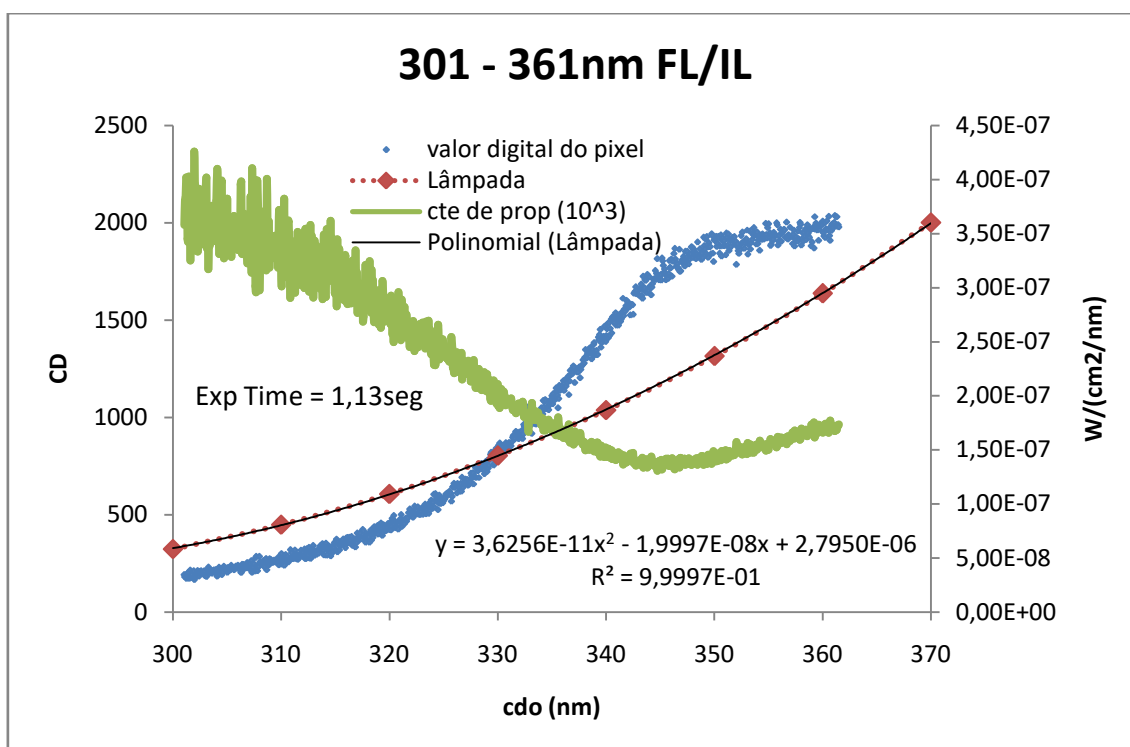


Figura 37 - Terceira medição (VELOD/Fibra Líquida/Interface Líquida), em laboratório, no intervalo espectral 301 - 361nm

Verifica-se que a forma da função que descreve a constante de proporcionalidade não é simétrica ao longo da curva da lâmpada. Este facto deve-se à função de interpolação dos pontos da lâmpada ser de segundo grau e também à função de transferência do sensor CCD no intervalo espectral considerado.

Devido a um *bug* no DAS, os valores da medida no intervalo 301-361nm do terceiro ciclo de medições resultaram baixos, apresentando-se como consequência de uma razão sinal-ruído demasiado alta; os pontos são mais dispersos e isso reflecte-se ainda mais no vector da constante de proporcionalidade.

É de realçar que o valor de R^2 (coeficiente de determinação) para qualquer gráfico é muito perto da unidade, demonstrando a bondade do ajuste entre as variáveis.

No que toca às medições efectuadas no exterior, o procedimento foi praticamente idêntico. As fibras ópticas e as interfaces utilizadas foram exactamente as mesmas, trocando somente a lâmpada pela radiação solar.

Estas medições foram igualmente realizadas com a rede de difracção nos mesmos intervalos espectrais do que as medições realizadas em laboratório.

Foram novamente obtidos os valores nas nove colunas, respectivas ao comprimento de onda e às contagens digitais e o respectivo Tempo de Exposição.

O produto das constantes de proporcionalidade por *pixel* obtidas em laboratório com os valores digitais da radiação solar e com o respectivo Tempo de Exposição fornece o valor da radiância para cada *pixel* (Equação 6):

$$\frac{\text{Radiância}}{\text{pixel}} = cte \text{ prop}(pix) \times CD(pix) \times TExp \quad (6)$$

Foram obtidos os respectivos gráficos, onde se observa, em cada intervalo espectral, o valor da contagem digital de cada *pixel* a azul (eixo da esquerda), a série espectral calibrada a verde (eixo da direita) e o respectivo Tempo de Exposição.

Como exemplo do trabalho desenvolvido na folha de cálculo, estão representados apenas os gráficos do primeiro intervalo espectral de cada ciclo de medição.

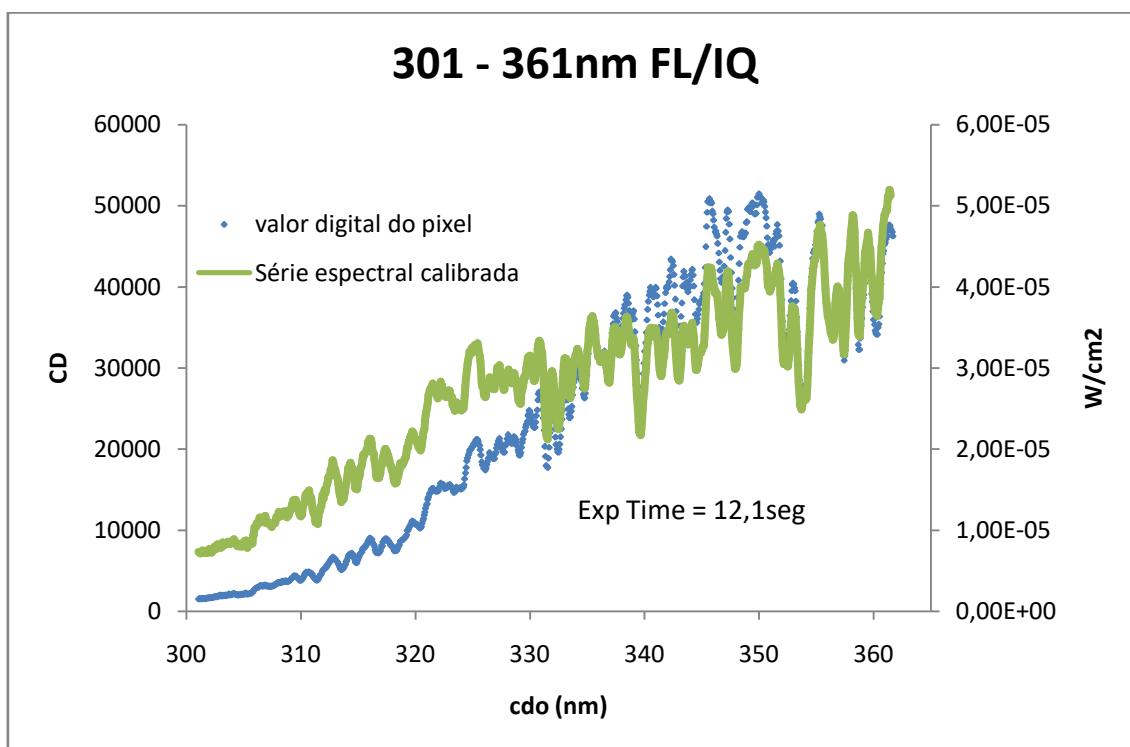


Figura 38 - Primeira medição (VELOD/Fibra Liquida/Interface Quartzzo), no exterior, no intervalo espectral 301 - 361nm

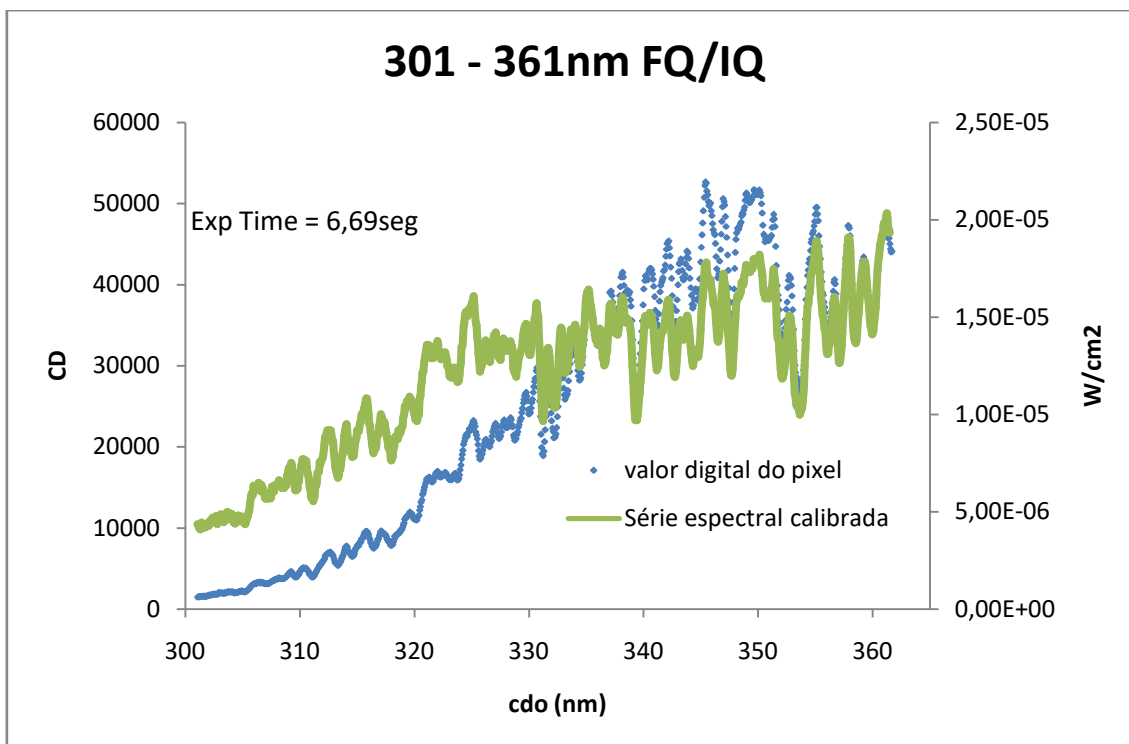


Figura 39 - Segunda medição, (VELOD/Fibra Quartzo/Interface Quartzo), no exterior, no intervalo espectral 301 - 361nm

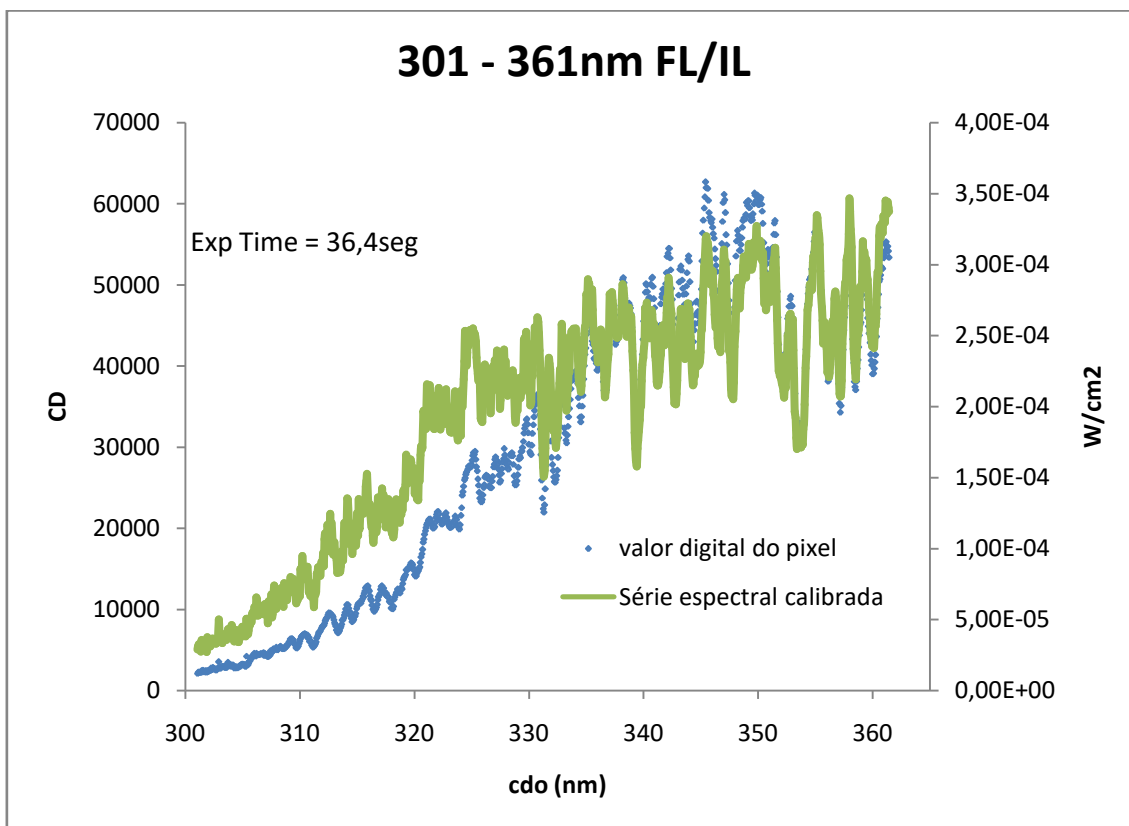


Figura 40 - Terceira medição, (VELOD/Fibra Líquida/Interface Líquida), no exterior, no intervalo espectral 301 - 361nm

Observa-se que são mantidas as características dos máximos e mínimos absolutos relativos e que varia a inclinação da série.

Para além disto, através de uma integração foi possível obter o valor da potência da lâmpada/nanómetro e, através da sua soma, foi possível obter a potência da radiação solar em cada intervalo espectral. Esses valores estão representados nas Tabelas 5, 6 e 7:

Tabela 5 - Radiância total e tempo de exposição, primeira medição no exterior

1ª - fibra óptica líquida na interface de quartzo		
Intervalo espectral (nm)	Radiância Total no intervalo (W/m^2); $\pm 10\%$ de erro	Tempo de Exposição (seg)
301 - 361	2,46	12,1
361 - 412	4,31	6,64
412 - 463	7,50	6,79
463 - 507	8,38	5,35
507 - 553	10,25	5,84
553 - 600	13,57	7,06
600 - 646	16,86	10,1
646 - 690	23,14	13,9
690 - 738	30,54	10,0
740 - 785	49,20	15,3
Radiância total	166,21	---

Pode-se observar que os valores de radiância aumentam ao longo do comprimento de onda, seguindo o andamento do gráfico dos valores de radiância da lâmpada de calibração. Este comportamento não é o esperado, pois o máximo da radiação solar seria aproximadamente aos 500nm. Este aspecto comprova que não é possível efectuar medidas cruzando tipos de fibras ópticas com diferente tipos de interfaces. Uma ilustração do enunciado anteriormente pode ser vista na Figura 41 que representa as séries espectrais calibradas e unidas numa só série espectral de 300 a 785nm.

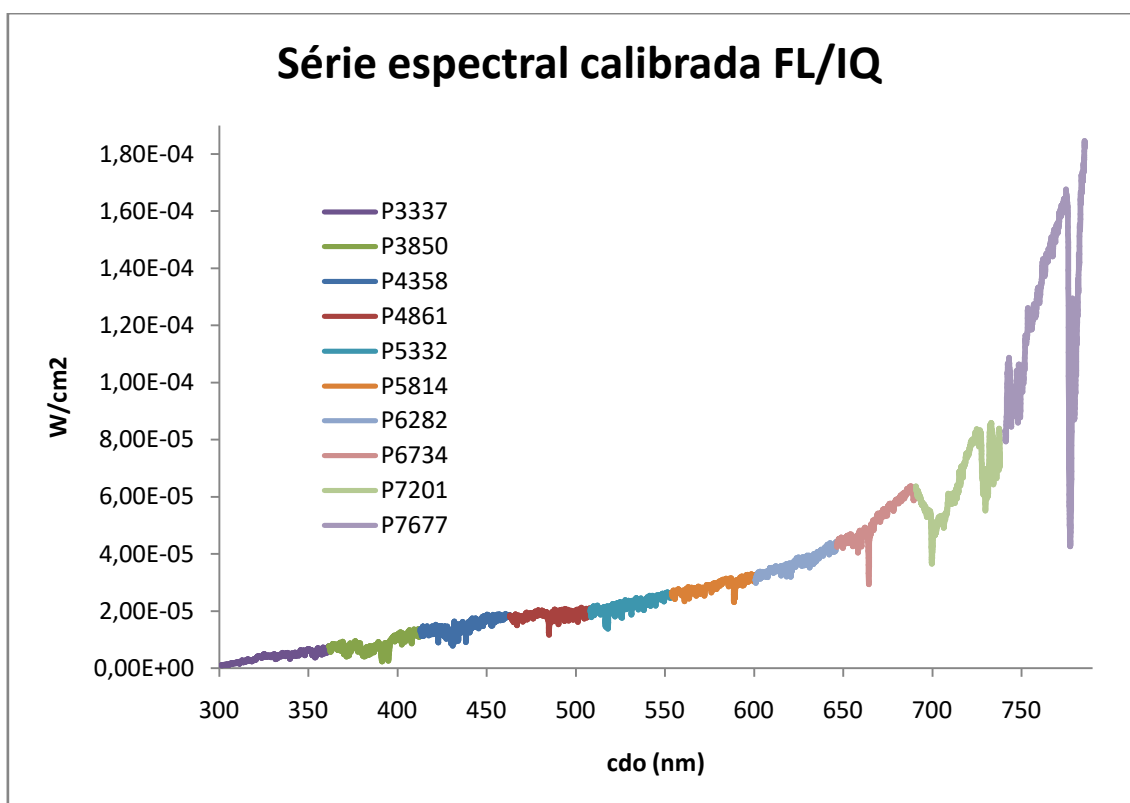


Figura 41 - Série espectral calibrada para Fibra Líquida/Interface Quartzo

Na Tabela 6 existe um intervalo espectral a menos (740-785nm) porque o Tempo de Exposição aqui obtido era maior que o Tempo de Exposição máximo permitido pela medida. A medição 740-785nm não foi considerada na análise.

Tabela 6 - Radiância total e tempo de exposição, segunda medição no exterior

2ª - fibra óptica quartzo na interface de quartzo		
Intervalo espectral (nm)	Radiância Total no intervalo (W/m^2); $\pm 10\%$ de erro	Tempo de Exposição (seg)
301 - 361	1,46	6,69
361 - 412	1,97	3,5
412 - 463	2,95	3,02
463 - 507	2,71	2,53
507 - 553	2,39	2,63
553 - 600	2,14	2,88
600 - 646	1,30	5,76
646 - 690	1,01	14,9
690 - 738	0,56	35,8
Radiância total	16,49	---

Verifica-se que os valores da radiação são muito mais baixos que na primeira medição, mas ao longo do comprimento de onda o sinal apresenta um máximo aproximadamente nos 500nm. A Figura 42 mostra os valores da tabela 6 onde se individualiza a forma característica do espectro da radiação à superfície (lei de *Wien* – Figura 8).

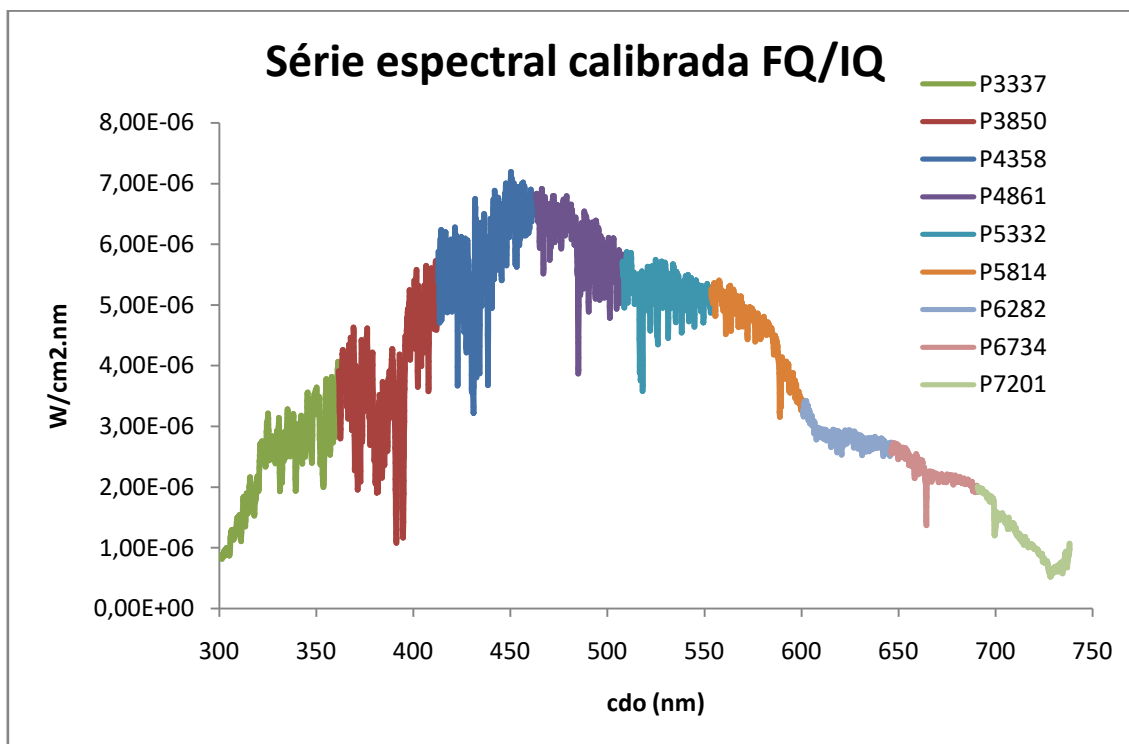


Figura 42 - Série espectral calibrada para Fibra Quartzo/Interface Quartzo

Tabela 7 - Radiância total e tempo de exposição, terceira medição no exterior

3ª - fibra óptica líquida na interface líquida		
Intervalo espectral (nm)	Radiância Total no intervalo (W/m^2); $\pm 10\%$ de erro	Tempo de Exposição (seg)
301 - 361	116,70	36,4
361 - 412	46,16	18,9
412 - 463	47,30	17,0
463 - 507	5,00	5,85
507 - 553	27,36	14,5
Radiância total	242,52	---

A Tabela 7 apenas contém cinco intervalos espectrais uma vez que a fibra líquida utilizada apresenta uma boa transmissão do sinal só para o comprimento de onda menor que 550nm.

8. Conclusões

O trabalho realizado nos últimos meses permitiram-me aprender os princípios da óptica geométrica aplicados ao funcionamento de instrumentação espectrofotométrica que não é, no entanto, de fácil acesso durante o curso universitário. Eu aprendi a trabalhar com os programas de aquisição de dados e de cálculo que possibilitaram, respectivamente, realizar medidas espectrais de lâmpadas radiométricas e medições de radiação solar que levou para o principal objectivo deste trabalho de tese, ou seja, a calibração radiométrica de equipamentos de espectrometria. O instrumento SPATRAM2 foi originalmente concebido para a aplicação da espectroscopia de absorção óptica diferencial, trabalhando em diferenças de sinal medidos para a determinação de colunas de gás minoritários da atmosfera. A calibração radiométrica efectuada irá permitir utilizar o SPATRAM2 como fotómetro espectral, permitindo obter medidas de radiância solar espectral e de comparações/validações dos resultados com outros instrumentos que medem a banda larga com filtros, que se encontram instalados no observatório do ICT (como os radiómetros UV, o fotómetro CIMEL, o radiómetro de micro ondas HatPro) utilizados pelo estudo das propriedades e caracterização dos aerossóis atmosféricos e da qualidade do ar.

9. Referências

- [1] [Online]. Available: <http://light-measurement.com/basic-radiometric-quantities/>
[Acedido em 2016 Ago 21]
- [2] [Online].Available:
http://www.ufrgs.br/labcon2/Aula20_GrandezasFotometricas.pdf [Acedido em 2016 Ago 21]
- [3] [Online].Available:
http://fisica.uc.pt/fa/discs/wc.show_doc.php?id_disc=195&id_turma=&id_typ=19&id_typedoc=2&id_doc=21776&anolect=20092010 [Acedido em 2016 Ago 21]
- [4] [Online].Available:
<http://www.cienciaquimica.hpg.com.br>, <http://www.mspc.eng.br>, <http://fisica.ufpr.br> [Acedido em 2016 Jul 5]
- [5] BRIEN, J. O., 1963: Radiation belts, *Scientific American*, 208, 5, 84-96.
- [6] AKASOFU, S.I., 1989: The dynamic aurora, *Scientific American*, 260, 5, 54-63.
- [7] [Online]. Available:<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/a-composicao-ar.htm> [Acedido em 2016 Jul 5]
- [8] [Online].Available: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Atmosfera> [Acedido em 2016 Jul 6]
- [9] MORAES, Paula Louredo. "Composição do ar"; *Brasil Escola*.
- [10] [Online].Available:
<http://www.prof2000.pt/users/elisabethm/geo7/clima/atmosferap.htm> [Acedido em 2016 Jul 6]
- [11] [Online].Available:
<http://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/poluicao-atmosferica-causas-consequencias-e-responsabilidades.htm> [Acedido em 2016 Jul 8]
- [12] [Online].Available: <http://www.fpcolumbofilia.pt/meteo/main063.htm>
[Acedido em 2016 Jul 23]
- [13] [Online].Available: <http://ambiente.maiadigital.pt/ambiente/ar/mais-informacao-1/ar-ambiente> [Acedido em 2016 Jul 6]
- [14] [Online].Available: <http://www.ccdr-alg.pt/site/> [Acedido em 2016 Jul 11]
- [15] [Online].Available: pt.solar-energia.net/definicoes/luz-solar.html [Acedido em 2016 Jul 20]
- [16] [Online].Available: www.solar.unifei.edu.br/pdf/EAM10_CAP2.pdf
[Acedido em 2016 Ago 7]
- [17] [Online].Available: www.das.inpe.br/ciaa/cd/HTML/sol/4_11.htm
[Acedido em 2016 Ago 7]

- [18] [Online].Available:
http://www.fap.if.usp.br/~akerr/artigo_epef.pdf[Acedido em 2016 Jul 12]
- [19] [Online].Available: <https://pt.scribd.com/doc/22628770/A-atmosfera-e-a-Radiacao-Solar> [Acedido em 2016 Jul 16]
- [20] [Online].Available: <http://pt.slideshare.net/acbaptista/a-atmosfera-e-a-radiao-solar> [Acedido em 2016 Ago 10]
- [21] [Online].Available:
http://www.etecbest.com.br/janeladofructicultor/artigos/download/04_TXT_RAD_SO L_COMPILA_ROMERA_2010/RADSOL.pdf [Acedido em 2016 Ago 8]
- [22] R. Mendes, Instrumentação Ambiental de Detecção Remota aplicada ao estudo de Componentes Minoritários na Atmosfera Antártica - Tese,2014
- [23] [Online].Available:
http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf [Acedido em 2016 Ago 11]
- [24] JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.
- [25] [Online].Available:
<https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/SensoriamentoRemoto.aspx> [Acedido em 2016 Ago 12]
- [26] [Online].Available: <http://www.ufrgs.br/engcart/PDASR/estrim.html> [Acedido em 2016 Ago 16]
- [27] [Online].Available: <http://www.espectrometria.com/> [Acedido em 2016 Ago 10]
- [28] [Online].Available:
<http://knoow.net/cienciasexactas/fisica/espectrometro/> [Acedido em 2016 Ago 10]
- [29] D. Bortoli, SPATRAM - SPectrometer for Atmospheric TRAcers Measurements - a Prototype Equipment for the monitoring of minor compounds of the atmosphere - PHD Tese, 2005
- [30] A. P. Cracknell& C. A. Varotsos, "Remote Sensing and Atmospheric Ozone: Human Activities versus Natural Variability, 2012
- [31] [Online].Available: <http://www.ghinstruments.com/products/spectral-irradiance-illuminance-standards/ol-200220245-high-accuracy-irradiance-standards/> [Acedido em 2016 Jun 11]
- [32] [Online].Available: <http://www.ghinstruments.com/products/spectral-radiance-luminance-standards/ol-455-high-intensity-integrating-sphere-calibration-standard/> [Acedido em 2016 Jun 13]

- [33] [Online].Available:
http://www.photoanalytical.com/public/photo_prodotti/75.pdf [Acedido em 2016 Jun 13]
- [34] [Online].Available: https://goochandhousego.com/wp-content/uploads/2014/01/2011_Catalog_Rev_G.pdf [Acedido em 2016 Jun 17]
- [35] A. Domingues, Improvement of Algorithms for the Assessment of Air Quality and Atmospheric Composition from Observation of Spectral Radiances - PHD Tese, 2015
- [36] [Online].Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Fibra_%C3%B3ptica [Acedido em 2016 Jun 17]
- [37] [Online].Available: <https://www.oficinadanet.com.br/artigo/redes/o-que-e-fibra-optica-e-como-funciona> [Acedido em 2016 Jun 20]
- [38] [Online].Available: <http://www.tecmundo.com.br/web/1976-o-que-e-fibra-optica-.htm> [Acedido em 2016 Jun 20]
- [39] [Online].Available: http://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/wdm1/Fibraspticas-ConceitoseComposio.html [Acedido em 2016 Jun 23]
- [40] [Online].Available:
http://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/wdm1/Vantagensedesvantagensdasfibras.html [Acedido em 2016 Jun 25]
- [41] [Online].Available: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/a-utilizacao-fibra-optica.htm> [Acedido em 2016 Jun 25]
- [42] [Online].Available: <http://evunix.uevora.pt/~db/SPATRAM/DAS.html> [Acedido em 2016 Jun 27]
- [43] [Online].Available: <http://evunix.uevora.pt/~db/SPATRAM/gui.html> [Acedido em 2016 Jun 27]
- [44] Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução nº 03/90